

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales

2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# “Análisis de la radiación en Marte mediante el software OLTARIS”

---

Leonor Perla Llorente

Tutor:

Carlos Santiuste Romero

15 Octubre 2018, Leganés, Madrid



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor la atención y los buenos consejos que he recibido de su parte.

Por supuesto, gracias a mi familia que nunca me ha puesto límites a soñar y me han enseñado que se puede lograr lo que se quiere. Gracias también por aguantar mi humor en los momentos de mayor estrés a lo largo de la carrera.

Gracias a Jorge, por animarme siempre que algo parecía imposible y cuando pensaba que no iba a llegar a tiempo.

Gracias a mis compañeros de clase y amigos, por convertir en risas cada momento duro que hemos pasado, cada hora de biblioteca, cada práctica de laboratorio.

Gracias también a mis compañeros de trabajo, por todo lo que me han enseñado este último año, por enseñarme que trabajar puede ser divertido y por descubrirme de esta forma el mundo de la fabricación.

Por último, me gustaría también dar las gracias a todas aquellas mujeres que lucharon por hacerse un hueco en el mundo de la Ingeniería y que han hecho que hoy en día cada vez seamos más las que disfrutemos de este mundo tan apasionante y que se nos valore como una persona más por estudiar y aprender sobre lo que nos gusta.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1.	MOTIVACIÓN .....	10
1.2.	OBJETIVOS.....	11
1.3.	RESUMEN.....	11
<b>CAPÍTULO 2.</b>	<b>BASE TEÓRICA Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>15</b>
2.1.	CONDICIONES DE VIDA HUMANA.....	15
2.2.	HABITABILIDAD DE LOS PLANET.....	18
2.2.1.	ZONA HABITABLE (ZH).....	19
2.2.2.	VARIACIÓN ESTELAR .....	20
2.2.3.	METALICIDAD DE LA ESTRELLA.....	20
2.2.4.	MASA PLANETARIA.....	21
2.2.5.	ÓRBITA.....	22
2.2.6.	ROTACIÓN.....	22
2.2.7.	BIOMASA .....	23
2.2.8.	JÚPITER.....	23
2.3.	ASENTAMIENTO EN MARTE .....	24
2.3.1.	A LO LARGO DE LA HISTORIA .....	24
2.3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL PLANETA.....	28
2.3.3.	RIESGOS PARA EL SER HUMANO.....	29
2.4.	RADIACIÓN .....	30
2.4.1.	FUENTES DE RADIACIÓN EN EL ESPACIO.....	31
2.4.1.1.	RADIACIÓN CÓSMICA (GCR).....	31
2.4.1.2.	EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES (ESP).....	33
2.4.1.3.	CINTURONES DE RADIACIÓN .....	34
2.4.2.	MAGNITUDES EN LA RADIACIÓN.....	35
2.4.3.	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN ESPACIAL EN EL SER HUMANO.....	42

2.5. NIVELES DE RADIACIÓN EN MARTE.....	50
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN EN MARTE MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE OLTARIS.....</b>	<b>55</b>
3.1. OLTARIS .....	55
3.1.1. CONDICIONES DE CONTORNO.....	56
3.1.1.1. EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES (ESP).....	56
3.1.1.2. RADIACIÓN CÓSMICA.....	58
3.1.1.3. OTRAS CONDICIONES DE CONTORNO.....	59
3.1.2. TRANSPORTE DE PARTÍCULAS .....	60
3.1.3. FUNCIONES DE RESPUESTA .....	61
3.2. PHANTOM HUMANO .....	61
3.3. ANÁLISIS CON OLTARIS.....	62
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
4.1. FLUJO DE LAS FUENTES DE RADIACIÓN EN MARTE .....	68
4.2. COMPARACIÓN ENTRE DOSIS DE EXPOSICIÓN DE LAS FUENTES DE RADIACIÓN EN MARTE .....	69
4.3. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN CÓSMICA EN MARTE .....	72
4.4. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN POR EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES EN MARTE .....	75
4.5. ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN SEGÚN LA PROTECCIÓN .....	79
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	82
5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 2.1.1. Límites de concentración de oxígeno para el ser humano (Fuente:N. Wolchover. " What Are the Limits of Human Survival?". Live Science) .....	16
Fig 2.1.2. Límites de temperatura para el ser humano (Fuente: Fuente:N. Wolchover. " What Are the Limits of Human Survival?". Live Science) .....	18
Fig 2.1.3. Límites de la Zona Habitable (HZ) e influencia del tipo de estrella..	20
Fig 2.1.4. Correlación entre la metalicidad de la estrella y los planetas de su sistema (Fuente: The planet-metallicity correlation. Fisher & Valenti 2005)....	21
Fig 2.3.1. Primera foto "clara" de la superficie de Marte tomada por el Viking 1 (Fuente: NASA via <a href="https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_910.html">https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_910.html</a> ) .....	26
Fig 2.3.2. Localización de las diferentes misiones enviadas a Marte.....	27
Fig 2.4.1. Fuentes de radiación en el espacio (Fuente: NASA-STD-3000 154)	31
Fig 2.4.2. Flujo de GCR en función de su energía (Fuente: S. Swordy, The energy spectra and anisotropies of cosmic rays, 2001) .....	32
Fig 2.4.3. Diferencia entre fulguraciones y eyecciones de masa coronal (Fuente: Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space) .....	33
Fig 2.4.4. Relación entre el ciclo solar y los GCR (Fuente: Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space) .....	34
Fig 2.4.5. Cinturones de Van Allen (Fuente: NASA vía <a href="https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html">https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html</a> ) .....	35
Fig 2.4.6. Factores de ponderación de radiación de neutrones en función de su energía (Fuente: ICRP 103) .....	39
Fig 2.4.7. Cálculo de la dosis efectiva mediante la ponderación del género (Fuente: ICRP 103) .....	41
Fig 2.4.8. Distribución acumulada de exposición a la radiación para un nivel aceptable de riesgo. ....	43

Fig 2.5.1. Valores de radiación cósmica en la superficie de Marte (Fuente:Mars Exploration Program Analysis Group via <a href="https://mepag.jpl.nasa.gov/">https://mepag.jpl.nasa.gov/</a> ).....	51
Fig 2.5.2. Dosis media de exposición a la radiación captada por el experimento Marie desde marzo de 2002 hasta septiembre de 2003 (Fuente: NASA).....	52
Fig 2.5.3. Monitorización de los valores captados por el RAD (Fuente: Variations of dose rate observed by MSL/RAD in transit to Mars. A&A).....	53
Fig 3.1.1. Flujo de trabajo de OLTARIS (Fuente: OLTARIS) .....	55
Fig 3.1.2. Comparación de los distintos eventos solares que permite seleccionar OLTARIS .....	58
Fig 3.2.1. Phantom humanos usados en OLTARIS (Fuente: OLTARIS) .....	62
Fig 3.3.1. Selección de geometría en OLTARIS .....	63
Fig 3.3.2. Selección de entorno de radiación GCR en OLTARIS.....	64
Fig 3.3.3. Selección de entorno de radiación EPS en OLTARIS .....	64
Fig 3.3.4. Selección de altitud sobre la superficie de Marte en OLTARIS .....	65
Fig 3.3.5. Selección de phantom en OLTARIS .....	66
Fig 4.1.1. Flujo vs Energía de las partículas de radiación cósmica a 10km sobre la superficie de Marte.....	68
Fig 4.1.2. Flujo vs Energía de las partículas de EPS a 10km sobre la superficie de Marte .....	69
Fig 4.2.1. Dosis equivalente anual recibida por un hombre (CAM) en función de la altitud sobre la superficie de Marte con una protección de 0,4g/cm <sup>2</sup> de aluminio.....	70
Fig 4.2.2. Dosis equivalente anual recibida por un hombre (CAM) en función de la altitud sobre la superficie de Marte con una protección de 20 g/cm <sup>2</sup> de aluminio.....	71
Fig 4.3.1. Dosis efectiva equivalente anual por exposición a la radiación cósmica en función de la altitud y protección.....	72
Fig 4.3.2. Dosis de exposición anual en el cristalino por exposición a la radiación cósmica.....	73

Fig 4.3.3. Dosis de exposición anual en la piel por exposición a la radiación cósmica.....	74
Fig 4.3.4. Dosis de exposición anual en BFO por exposición a la radiación cósmica.....	74
Fig 4.3.5. Dosis de exposición anual en el corazón por exposición a la radiación cósmica.....	74
Fig 4.3.6. Dosis de exposición anual en el sistema nervioso central por exposición a la radiación cósmica.....	75
Fig 4.4.1. Dosis efectiva equivalente anual por exposición al evento de partículas solares Carrington 1859 en función de la altitud y protección .....	76
Fig 4.4.2. Dosis de exposición anual en el cristalino por exposición a evento de partículas solares .....	77
Fig 4.4.3. Dosis de exposición anual en la piel por exposición a evento de partículas solares .....	77
Fig 4.4.4. Dosis de exposición anual en BFO por exposición a evento de partículas solares .....	78
Fig 4.4.5. Dosis de exposición anual en el corazón por exposición a evento de partículas solares .....	78
Fig 4.4.6. Dosis de exposición anual en el sistema nervioso central por exposición a evento de partículas solares .....	78
Fig 4.5.1. Exposición a la radiación de EPS en función de la protección a 10km sobre la superficie de Marte .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 2.4.1. Vida media de diversos elementos .....	36
Tabla. 2.4.2. Factores de ponderación de la radiación recomendados (Fuente: ICRP 103).....	39
Tabla. 2.4.3. Factores de ponderación de los tejidos recomendados (Fuente: ICRP 103).....	40
Tabla. 2.4.4. Principales parámetros para monitorizar la radiación. ....	42
Tabla. 2.4.5. Límites de exposición en la carrera para astronautas de la NASA en función del género y edad. (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) .....	48
Tabla. 2.4.6. Límites de exposición anuales para astronautas de la NASA en función del género y edad. (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) .....	48
Tabla. 2.4.7. Diferencia entre los límites de exposición para un astronauta y un ciudadano (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) .....	49
Tabla. 2.4.8. Límites de exposición para los principales órganos (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) .....	49
Tabla. 2.4.9. Límites de exposición a la radiación de la ESA (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) ....	50
Tabla. 2.4.10. Límites de exposición a la radiación de la RSA (Fuente: NASA. “Radiation risk acceptability and limitations”. Francis A. Cucinotta, Ph.D.) ....	50
Tabla. 3.1.1. Parámetros de deceleración de los mínimos y máximos solares registrados en OLTARIS (Fuente: OLTARIS).....	59
Tabla. 3.1.2. Isotopos del modelo de transporte de OLTARIS (Fuente: OLTARIS).....	61
Tabla. 3.3.1. Escenarios simulados en OLTARIS .....	66



Tabla. 4.3.1. Escenarios que no superan los límites de exposición a la radiación establecidos por la NASA en función de edad y género. ....	77
--	----

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN

Desde el principio de su existencia, el ser humano y sus ganas de descubrir han estado en continuo movimiento, buscando constantemente ampliar las fronteras. Ya sea por la búsqueda de nuevos terrenos que conquistar, la necesidad de emigrar del lugar de origen o la mera curiosidad, el ser humano ha ido explorando mundos desconocidos a lo largo de su historia.

Hace 100.000 años los primeros Homo sapiens dejaron África del este para expandirse por el resto del mundo. Cristóbal Colón dejó atrás el continente europeo para dirigirse por nuevas rutas submarinas a las Indias que le llevarían a descubrir un nuevo continente. Han sido numerosos individuos a lo largo de la historia los que con sus viajes han ido contribuyendo a conocer más en detalle el inmenso planeta que es la Tierra, permitiendo conocer sus entresijos e ir poblando sus tierras.

Actualmente, en un mundo en el que se han traspasado las fronteras, quedan dos lugares que aún son grandes desconocidos para el ser humano, las profundidades de los océanos y el espacio exterior. Desde hace ya bastantes años, el sueño de la exploración está puesto en el universo y el ser humano apunta a años luz de la Tierra. En un mundo que no deja de crecer, son muchos los que creen que el ser humano podría buscar una segunda casa fuera del planeta Tierra y empezar a poblar planetas y cuerpos cercanos. Durante finales del siglo XX y principios del siglo XXI, la idea de mandar civilización al espacio ha ido tomando cada vez más importancia.

Con la vista puesta en crear asentamientos fuera del planeta Tierra, el ser humano se enfrenta a nuevos retos y riesgos “desconocidos”. Uno de estos retos es el hecho de ser capaces de proteger al ser humano frente a la gran radiación que existe en el espacio unida a los largos periodos de tiempo que el ser humano habitará en estos nuevos territorios.

Este proyecto pretende ser una parte de la base necesaria para construir un módulo habitable en Marte, capaz de proteger de la radiación existente al ser humano durante largos periodos de tiempo. El hecho de que recrear unas condiciones similares a las que se dan en Marte sea demasiado costoso y complejo de conseguir, hace que se cree una necesidad de realizar una serie de análisis previos a la construcción del módulo habitable.

Dichos análisis partirán de conceptos y cálculos generales que ayuden a entender el entorno radioactivo en Marte, para posteriormente irse concretando mediante análisis y estudios más aproximados hasta poder finalizar con la construcción de un módulo habitable adecuado.

El hecho de que los resultados que se quieren analizar busquen obtener un primer análisis de los diferentes parámetros que hay que considerar a la hora de construir un módulo habitable permanente en Marte hace que el software OLTARIS sea el elegido para llevar a cabo estos análisis. La rapidez a la hora de llevar a cabo las simulaciones, así como el hecho de que sea un software abierto, hacen de este una herramienta ideal para obtener una aproximación cercana a la realidad que permita posteriormente profundizar el análisis y continuar con el diseño completo del módulo.

## **1.2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto es realizar un primer análisis para realizar una estimación aproximada de los efectos de la radiación en la salud del ser humano. Se analizarán los efectos de la radiación proveniente de los rayos cósmicos (CGR) que afectan a largo plazo al ser humano y de los graves efectos puntuales que tienen los eventos solares (ESP) sobre la salud.

Con este primer estudio se pretende:

- Analizar los efectos de la radiación dependiendo de la altitud a la que se encuentre el asentamiento en Marte y, por tanto, del espesor de la atmósfera del planeta en ese punto.
- Analizar el efecto de distintos tipos de protección frente a la radiación en el ser humano, diferenciando los efectos en los dos géneros. Se analizarán dos tipos de espesor de la superficie protectora, simulando un traje espacial y una nave.
- Comparación de las dosis de exposición de los órganos principales en diversos escenarios calculadas mediante el software OLTARIS con los límites de exposición permisibles (PEL) de la NASA.

## **1.3. RESUMEN**

En primer lugar, se expondrán aquellas condiciones esenciales para que se desarrolle la vida humana, tales como la existencia de oxígeno, agua, nutrientes y condiciones determinadas de temperatura y fuentes energéticas.

Una vez expuestas dichas condiciones, se definen los requisitos por los que un planeta es denominado habitable y tendría más posibilidades que otros de albergar vida humana. Dichos requisitos vienen condicionados por las condiciones necesarias para que se desarrolle vida en el planeta y van unidos a las características de los planetas y de los sistemas planetarios en los que se encuentran.

A continuación, se hará una breve mención a la historia de las misiones a Marte, así como de la principal misión que ocupa el futuro de los viajes al espacio, la misión Mars One, cuyo objetivo es construir un asentamiento en el planeta. Junto a ello, se describen las características del planeta Rojo y las ventajas y desventajas que conllevaría mandar a los humanos al planeta con misiones de larga duración.

Uno de los riesgos principales que supone construir un asentamiento en Marte son los niveles de exposición a la radiación a los que estaría expuesto el ser humano. Se describen así las tres principales fuentes de radiación que existen en el espacio y, por lo tanto, en el planeta: radiación cósmica, eventos de partículas solares y cinturones de radiación.

Una vez conocidas las fuentes de radiación, es necesario conocer las formas de medir la radiación que permiten conocer el riesgo que esta supone para la salud de los seres humanos. De esta forma se exponen las principales magnitudes de radiación. Para conocer los efectos que la radiación tiene sobre la salud, así como el nivel de riesgo que supone, la NASA y otras agencias espaciales establecen distintos límites permisibles de exposición a la radiación para el ser humano y los órganos principales, en función de la edad, el género y la duración de la misión.

Una vez expuesta la base del proyecto, se define brevemente el software on-line con el que se van a realizar las simulaciones, OLTARIS. Esta es una herramienta abierta a todos los públicos que permite realizar estimaciones en periodos de tiempo relativamente cortos y que hace posible estimar las dosis de exposición frente a la radiación en distintos escenarios. De esta forma, es posible realizar estudios con resultados aproximados que permiten apreciar los efectos que tienen distintas condiciones de contorno en los niveles de exposición.

Finalmente, se realiza el estudio con OLTARIS, mediante 48 simulaciones dadas por la variación de distintos parámetros como el género del ser humano, la altitud en el planeta o la protección frente a la radiación. En primer lugar, se comparará las diferencias entre

las dos fuentes de radiación principales: eventos de partículas solares y radiación cósmica; para posteriormente analizar ambas fuentes de radiación por separado.

## **CAPÍTULO 2**

### **BASE TEÓRICA Y ANTECEDENTES**

## CAPÍTULO 2. BASE TEÓRICA Y ANTECEDENTES

### 2.1. CONDICIONES DE VIDA HUMANA

No existe una definición específica en lo que a condiciones de vida se refiere, así como no existe ningún experimento hasta la fecha que determine unas condiciones que apliquen a la vida de todo ser vivo. Sin embargo, se pueden establecer algunas características o condiciones esenciales que los seres humanos necesitan indispensablemente para sobrevivir.

A la hora de determinar si un planeta o una luna es un buen candidato para albergar vida humana, los astrobiólogos usan determinados criterios, basándose en las condiciones principales que se dan en la Tierra y que hacen que el ser humano se mantenga con vida.

- **Oxígeno:** el aire atmosférico contiene un 21% de oxígeno y según la OSHA el rango óptimo para el ser humano oscila entre el 19,5% y el 23,5% de oxígeno. Este es un elemento clave en todas las reacciones químicas que se producen en el organismo y principal en aquellas encargadas de producir ATP.

Cuando el organismo carece de oxígeno, las células empiezan perder funciones, la respiración se vuelve intermitente e incluso si el porcentaje menor al 6% de oxígeno puede causar daños cerebrales y a los 10 minutos la muerte clínica. Por otro lado, si el porcentaje de oxígeno es muy alto se forman radicales libres oxidantes que atacan los tejidos y las células del cuerpo, pudiendo incluso causar la muerte tras exposiciones prolongadas.



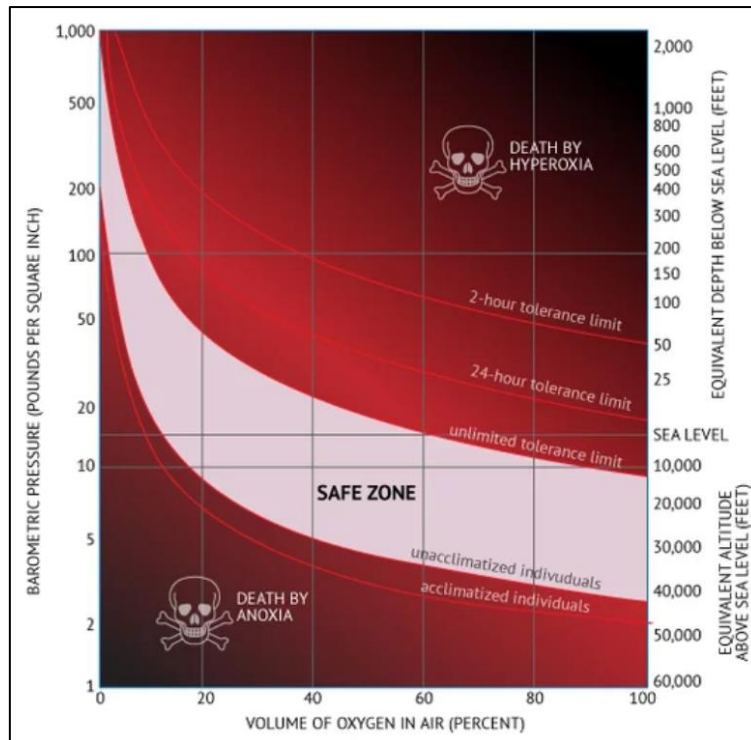


Fig 2.1.1. Límites de concentración de oxígeno para el ser humano (Fuente: N. Wolchover. "What Are the Limits of Human Survival?". Live Science)

- **Agua:** el agua es uno de los mayores componentes de los organismos, presente en gran porcentaje en las células y la sangre, llegando a formar el 70% de la masa de un adulto. Esta es un agente primordial en el desarrollo de numerosas reacciones químicas que se dan en los seres vivos. En su estado líquido sirve como transporte y disolvente de productos químicos, por lo que es necesario que se encuentre entre los 15 y 115 grados Celsius (59 – 239 grados Fahrenheit) para evitar así que se congele o se evapore. El agua también actúa como regulador de la temperatura corporal, evaporándose de la piel y enfriando así el cuerpo en situaciones de altas temperaturas.

Al ser usada por el organismo, el agua necesita ser repuesta constantemente, dependiendo la cantidad de distintos factores como el peso o la edad. De media, una persona puede perder al día 600ml en forma de orina, 400ml a través de la piel y unos 200 ml respirando.

- **Energía:** una fuente de energía es necesaria para llevar a cabo las reacciones metabólicas que realizan los seres vivos. Estos pueden recibirla en forma de luz o bien en forma de energía química, proveniente de moléculas orgánicas (ricas en carbono) e inorgánicas.

La energía solar solo está presente en aquellos planetas cercanos a estrellas que emitan este tipo de energía, como es el caso del Sol en el Sistema Solar, que es la estrella que proporciona energía a la Tierra. En relación con este tipo de energía, hay que tener en cuenta que la superficie del planeta que albergue vida deberá estar lo suficientemente cerca de la estrella como para tener un rango de temperatura aceptable para la vida humana, pero lo suficientemente alejado y protegido por una atmósfera como para proteger de la radiación y las partículas solares que emita la estrella.

Por otro lado, los seres vivos utilizan la energía química, presente en multitud de moléculas, mediante la división de estas en componentes más simples, obteniendo de estas reacciones pequeñas cantidades de energía que les permiten sobrevivir.

- **Nutrientes:** se entiende por nutrientes todas aquellas sustancias esenciales para la supervivencia, micronutrientes (vitaminas y minerales) y aquellos nutrientes que forman el ser vivo. Estos forman parte de numerosas reacciones químicas y procesos (impulsos nerviosos), así como parte de la estructura del cuerpo humano, como es el caso del Calcio, que forma los huesos. Los nutrientes solo pueden ser almacenados temporalmente por el cuerpo, por lo que necesitan ser repuestos constantemente, es decir, necesitan de un proveedor de nutrientes que sea capaz de regenerarlos, lo cual es posible si el planeta cuenta con eventos como erupciones volcánicas o sistemas climáticos.
- **Temperatura:** Aunque cada persona tiene un cuerpo diferente, capaz de adaptarse de forma distinta a las condiciones medioambientales, se puede estimar ciertos límites en los que ningún ser humano sobreviviría. Según un informe de la NASA de 1958, un ser humano puede sobrevivir indefinidamente en ambientes en los que la temperatura oscile entre 4°C y 35°C (40-95°F).

El cuerpo sufrirá hipertermia después de estar 10 minutos con 100% de humedad a más de 60°C. En cuanto a las temperaturas frías, el cuerpo humano no puede soportar una temperatura corporal inferior a 21°C.

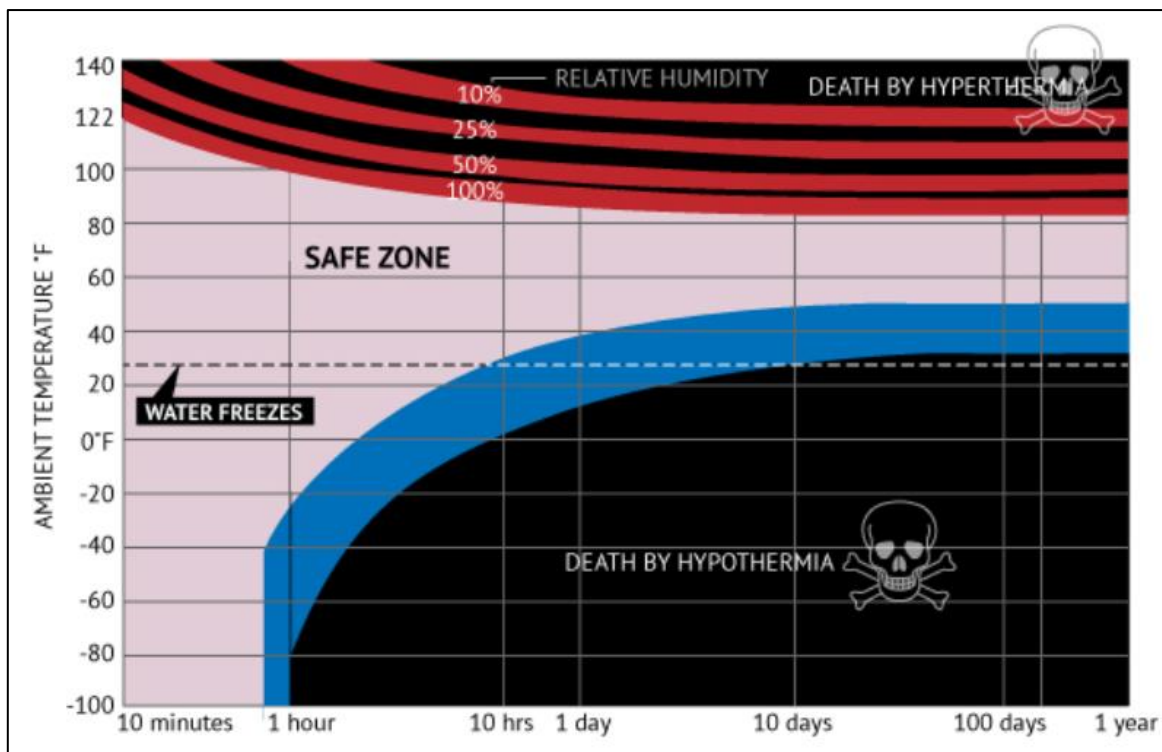


Fig 2.1.2. Límites de temperatura para el ser humano (Fuente: N. Wolchover. "What Are the Limits of Human Survival?". Live Science)

## 2.2. HABITABILIDAD DE LOS PLANETAS

Una vez entendidos los requisitos necesarios para que exista vida se debe de encontrar la manera en la que un planeta pueda suministrarlos. Debido a que la química se rige por las mismas reglas a lo largo de todo el universo, se cree que la vida se sustentará del mismo modo en otro planeta que en la Tierra. De esta forma, se han establecido una serie de características planetarias que, en caso de cumplirse, elevarían la posibilidad de encontrar vida en dicho planeta, o bien, de sobrevivir en el mismo.

Se define como planeta habitable todo aquel planeta candidato a sustentar vida debido a su capacidad para proporcionar agua en estado líquido, nutrientes y energía, así como de ser capaz de renovar dichos recursos. Debido al desconocimiento que todavía existe acerca de vida extraterrestre, los científicos extrapolan las características terrestres, así como las condiciones que se dan en la Tierra en torno al Sistema Solar, para encontrar planetas capaces de albergar vida.

De esta forma, existen ciertas condiciones, tanto del sistema solar en el que se encuentre el planeta, como del planeta en sí mismo, que aumentan la probabilidad de que este sustente vida.

### 2.2.1. ZONA HABITABLE (ZH)

La zona habitable se define como la distancia a una estrella en la que un planeta habitable es capaz de tener agua líquida (u otro disolvente potencial) en la superficie y sustentar vida similar a la terrestre. Esta zona debe estar lo suficientemente alejada para no sufrir las altas temperaturas que ocasione la estrella, ni sufrir de altos niveles de radiación; pero lo suficientemente cerca para tener temperaturas extremadamente frías.

Esta zona tiene su base en la posición de la Tierra en el Sistema Solar y la cantidad de radiación que recibe del Sol. También recibe el nombre de zona “Goldilocks”, basado en el cuento infantil de Rizitos de Oro (“Goldilocks and the Three Bears”) en la que una niña tiene que elegir entre tres objetos, ignorando aquellos demasiado grandes o demasiado pequeños (extremos) y eligiendo justo el término medio, el correcto.

Hay que evitar confundir zona habitable con habitabilidad de un planeta, ya que mientras la última se refiere a las condiciones estelares para contener un planeta habitable, la primera hace referencia a las condiciones necesarias para sustentar vida en el propio planeta.

La zona habitable debe ser estable, es decir, no debe variar demasiado en el tiempo. Esto está relacionado con el envejecimiento de la estrella cercana a la zona habitable. Cuando una estrella envejece aumenta su luminosidad, produciendo un alejamiento de la zona habitable. El ritmo al que la estrella envejezca condicionará el tiempo en el que el planeta se encuentre dentro de la zona habitable y, por tanto, el tiempo en el que será capaz de sustentar vida. Otra de las condiciones que hacen que una zona habitable sea estable es la ausencia de un gigante gaseoso en esta, ya que estos cuerpos impiden el desarrollo de planetas como la Tierra.

Tanto las características planetarias como la de sus sistemas solares afectan en la habitabilidad de los planetas. Los científicos también consideran la posibilidad de que determinadas zonas de una galaxia sean más favorables a albergar vida que otras:

- Fuera de zonas de cúmulos con gran densidad estelar en las que existe demasiada radiación y perturbaciones gravitacionales.
- Fuera de fuentes activas de rayos gamma.
- Fuera del centro de la galaxia, donde la densidad estelar es mayor, y donde se cree que puede existir un agujero negro supermasivo.

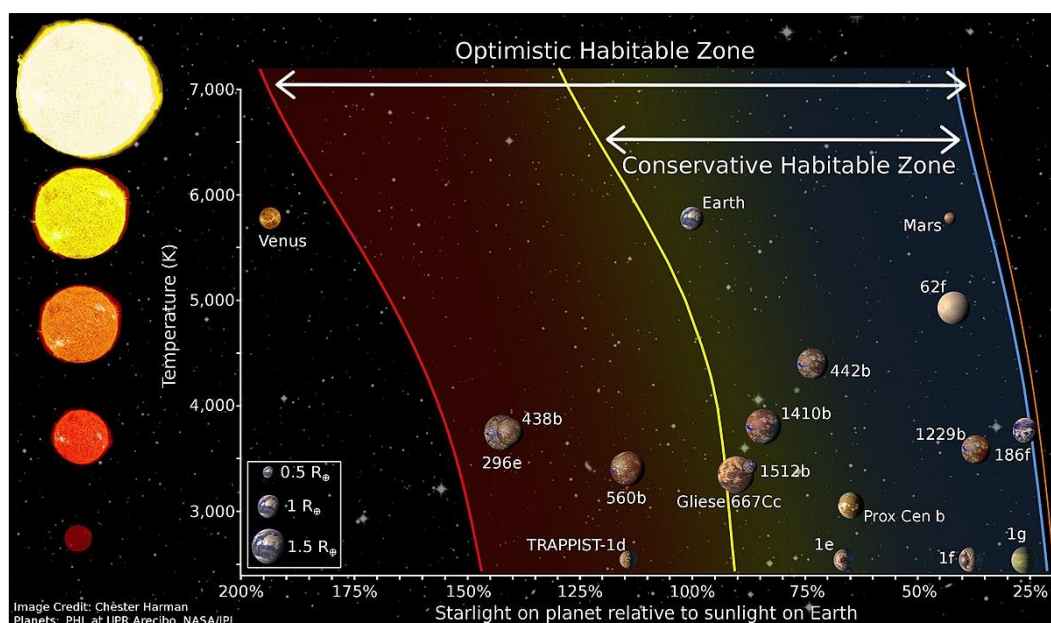


Fig 2.1.3. Límites de la Zona Habitable (HZ) e influencia del tipo de estrella

## 2.2.2. VARIACIÓN ESTELAR

La variación estelar o cambios de luminosidad de una estrella pueden darse en mayor o menor medida. Estas fluctuaciones a medida que se hacen mayores van unidas al incremento de los niveles de rayos gamma y rayos X que emiten, así como una variación muy grande de temperatura en los planetas cercanos a las estrellas que sufren dichas variaciones. De esta forma, los planetas cercanos a estrellas “inestables” serán impredecibles y tendrán condiciones muy extremas que le imposibilitarán sustentar vida en su interior.

La variabilidad estelar puede venir dada por fenómenos intrínsecos a la estrella, como por ejemplo la propia contracción y expansión de la estrella; o bien ajenos a esta, como la posibilidad de que la estrella sea eclipsada en intervalos por un cuerpo que orbite cercano a su órbita.

En general, la mayoría de las estrellas suelen ser relativamente estables, como el Sol, sufriendo un 0,1 por ciento de variación a lo largo de todo su ciclo solar. A pesar de ello, las pequeñas oscilaciones energéticas que el Sol ha sufrido durante su vida han afectado significativamente a la Tierra, causando la Edad de Hielo.

## 2.2.3. METALICIDAD DE LA ESTRELLA

En términos astrofísicos se entiende por metalicidad de un cuerpo como la proporción de su materia formada por elementos diferentes al hidrógeno (H) y al helio (He),

independientemente de que estos elementos sean nombrados metales por la Química. Las estrellas suelen estar formadas en su mayoría por estos dos elementos, pero también contienen elementos metálicos en su estructura.

La cantidad de estos elementos presente en la estrella determinará la probabilidad de que se formen planetas a su alrededor y la probabilidad de que estos planetas sean lo suficientemente pesados como para sustentar vida. A su vez, la proporción de elementos pesados en una estrella está relacionada con la edad de una estrella, ya que esta proporción aumenta con el tiempo cósmico. Por lo tanto, las estrellas más viejas serán más favorables a tener planetas habitables a su alrededor.

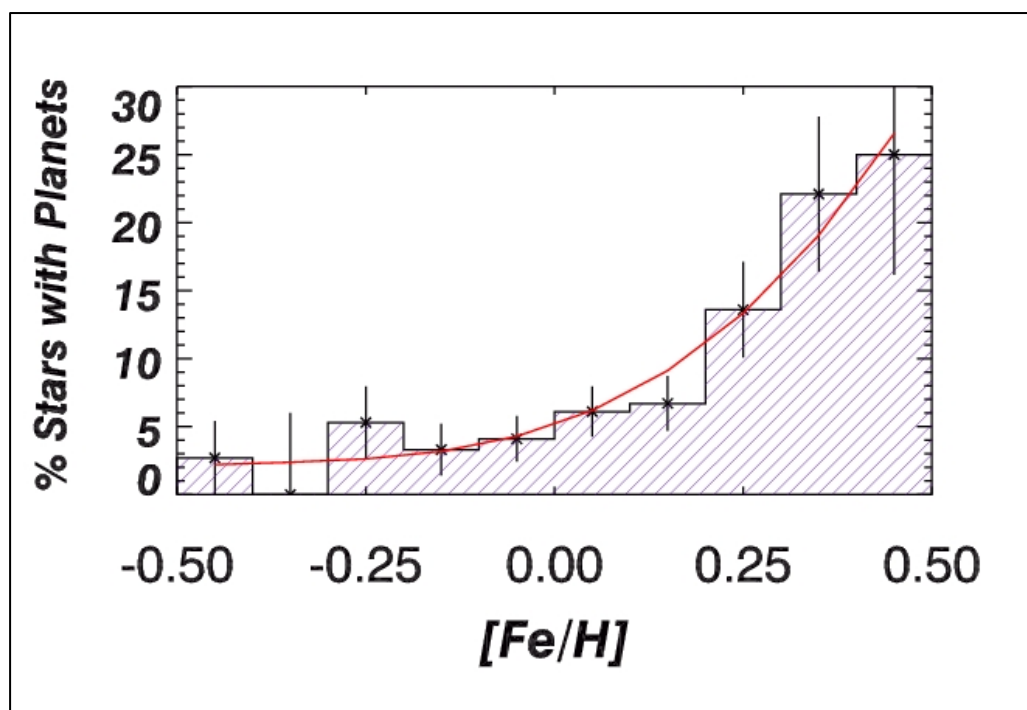


Fig 2.1.4. Correlación entre la metalicidad de la estrella y los planetas de su sistema (Fuente: *The planet-metallicity correlation*. Fisher & Valenti 2005)

#### 2.2.4. MASA PLANETARIA

Si observamos el Sistema Solar, la Tierra es el cuerpo terrestre más grande, tanto por su diámetro, como por masa y densidad. Esto hace posible que posea una gravedad suficiente que le permite contener su atmósfera.

Los planetas pequeños albergan dos problemas a la hora de ser candidatos para albergar vida. En primer lugar, al tener una baja gravedad, retener la atmósfera se hace difícil, ya que las partículas que lo forman serán más proactivas a desprenderse cuando el planeta



sufra colisiones o ráfagas de viento solar. El hecho de carecer de una buena atmósfera imposibilita que se desarrolle vida en el planeta, ya que cualquier ser vivo será expuesto a temperaturas extremas y altos niveles radioactivos; además, el planeta no podrá contener agua líquida con una atmósfera menor de 0,006 atmósferas terrestres. Por otro lado, los planetas pequeños tienden a morir geológicamente de manera más rápida, siendo la actividad geológica lo que permite que se renueven los nutrientes y la materia necesaria para la vida.

Sin embargo, existen casos aislados en los que otros cuerpos poseen una actividad geológica intensa a pesar de su pequeño tamaño, como es el caso del satélite Io de Júpiter, cuyas tensiones gravitatorias lo mantienen activo; o Europa, que contiene un océano líquido bajo una capa congelada. De esta manera, no se puede considerar la masa como único criterio de habitabilidad.

### **2.2.5. ÓRBITA**

Del mismo modo que las variaciones lumínicas de la estrella crean fluctuaciones en la temperatura del planeta, la excentricidad de la órbita del planeta determina las máximas y mínimas temperaturas que existen en el planeta. Cuanto mayor sea la excentricidad, es decir, mayor sea la diferencia entre la distancia del planeta a su estrella más cerca en sus puntos más cercanos y alejados, mayor será la variación de la temperatura en este. Hay que considerar que los seres vivos sólo son capaces de adaptarse a un rango de temperaturas.

En el caso de la Tierra, la excentricidad de la órbita no supera los 0,02, siguiendo una órbita casi cilíndrica; lo cual hace que las temperaturas en la tierra no varíen más de 100°C en los puntos más extremos.

### **2.2.6. ROTACIÓN**

Otro punto importante a la hora de definir si un planeta es habitable o no es la inclinación de su eje respecto a la eclíptica. El grado de inclinación determina la energía recibida en cada punto de la órbita, provocando así que existan estaciones en el planeta.

Los planetas con una inclinación poco apreciable tienden a tener climas mucho más fríos, ya que toda la radiación recibida se concentra en el ecuador. Además, estos planetas no tienen estaciones, por lo que la variación tan estimulante que estas ejercen sobre los seres vivos desaparece.

Por otro lado, aquellos planetas con una inclinación axial mucho mayor tampoco son demasiado favorables para sustentar vida, ya que las estaciones en ellos son mucho más extremas, provocando grandes variaciones y perturbaciones para la vida de los seres vivos.

Aparte de considerar la excentricidad de la órbita, también hay que tener en cuenta la velocidad de rotación del planeta, que marca el ciclo día y noche. En este caso, un planeta habitable tendrá que tener un ciclo día y noche similar al de la Tierra, ya que si, por el contrario, un día durase más de meses, la variación de temperatura entre el día y la noche será demasiado grande.

### **2.2.7. BIOMASA**

La Tierra está formada mayoritariamente por cuatro elementos químicos, el carbono, el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno. La vida en la Tierra se basa en estos cuatro elementos que constituyen más del 95% de su biomasa, por lo que el planeta habitable deberá poseer estos elementos y ser capaz de regenerarlos.

El hidrógeno junto con el oxígeno forma las moléculas de agua, de gran importancia en los procesos biológicos y las reacciones que ocurren en los seres vivos. El carbono es un componente que forma una gran cantidad de moléculas orgánicas que forman los seres vivos, y al unirse con el oxígeno formando enlaces covalentes libera gran parte de la energía que estos usan para sobrevivir. El nitrógeno es un componente esencial de numerosas moléculas orgánicas como el ADN o las proteínas.

Estos elementos están presentes en la Tierra, en gran medida formando parte de la atmósfera en estado gaseoso. Los ciclos biogeoquímicos son los encargados de regenerar y transformar estos elementos a través de los distintos microorganismos, plantas y animales.

### **2.2.8. JÚPITER**

Se conoce como “Good Jupiters” a los planetas gaseosos gigantes, similares a Júpiter, que orbitan lo suficientemente lejos de la ZH como para no causar perturbaciones y lo suficientemente cerca como para estabilizar los posibles planetas habitables. Este tipo de planetas ayudan a estabilizar la órbita de planetas interiores, más cercanos a la estrella, así como de mantener alejados a cometas y asteroides que pudiesen impactar con los posibles planetas habitables.



## **2.3. ASENTAMIENTO EN MARTE**

Tal y como dijo Aleksey Filippenko, ganador del premio Nobel de Física 2011 por el descubrimiento de la energía negra que acelera la expansión del universo, “Los científicos solo son conocedores del 4% del universo, lo que significa, que entienden bastante bien la naturaleza del 4% del universo. Aquello formado por átomos. El 96% del universo está formado por materia oscura y energía oscura”.

Gran parte de este 4% que han investigado los científicos, engloba el universo más “cercano” a la Tierra, el Sistema Solar. Durante muchos años los astrofísicos han estado buscando indicios de vida fuera de la Tierra, e incluso han soñado con la idea de crear civilizaciones fuera de esta.

Tras sucesivas misiones y estudio de los planetas que forman el Sistema Solar, Marte aparece como la alternativa más clara para optar a formar un asentamiento humano. Cumple con gran parte de las condiciones que tiene que tener un planeta habitable, similar a la Tierra, para ser capaz de sustentar vida; contiene agua, las temperaturas no son demasiado extremas, se encuentra a una distancia del Sol relativamente parecida a la de la Tierra, tiene una atmósfera que protege parcialmente de la radiación y sus características de tamaño y órbita hacen que la duración de los días sea similar a los días terrestres.

En el Sistema Solar también se encuentran dos cuerpos que, por cercanía a la Tierra, podrían considerarse cuerpos habitables, la Luna y Venus. El problema principal de estos cuerpos es que en la Luna un día equivale a un mes terrestre, y esta carece de atmósfera que proteja a los seres humanos frente a la radiación. En cuanto a Venus, las temperaturas alcanzan los 400°C y la presión atmosférica es equivalente a la que podemos encontrar a 1000 metros bajo el océano en la Tierra.

En general, Marte tiene todos los recursos necesarios para convertirse potencialmente en un planeta al que mandar vida humana. Actualmente, se ha convertido en el principal foco hacia el que orientar una posible misión para crear un asentamiento humano.

### **2.3.1. A LO LARGO DE LA HISTORIA**

Marte ha sido uno de los planetas que han asaltado la curiosidad de los astrofísicos y científicos a lo largo de la historia. Su cercanía a la Tierra ha hecho que sean numerosas

las misiones enviadas al planeta para intentar entender su pasado y su presente, así como las posibilidades que el planeta puede proporcionar al ser humano.

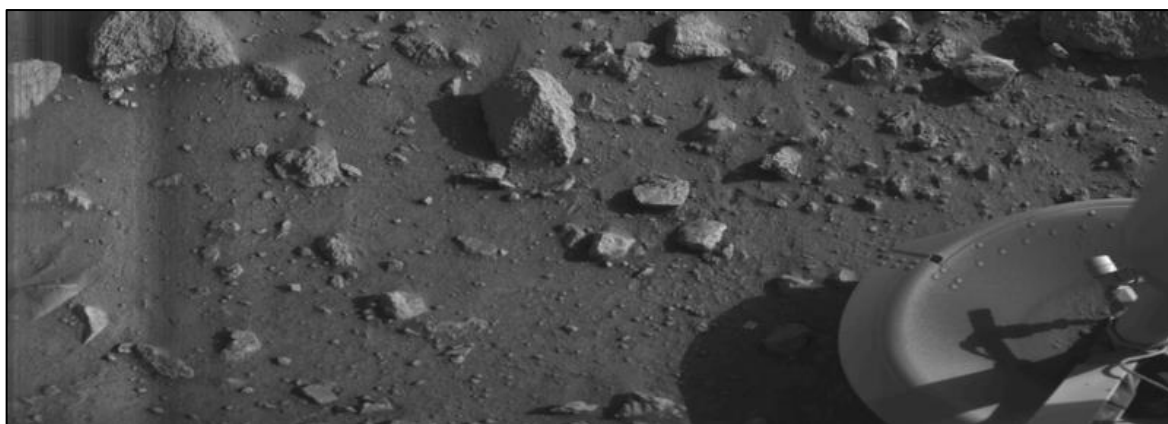
Los primeros en mirar hacia el Planeta Rojo fue la Unión Soviética, en los años 60, intentando lanzar varias sondas automáticas con la intención de sobrevolar el planeta y medir la radiación cósmica y el campo magnético de Marte, entre otras cosas. Marsnik 1 y 2 no llegaron a alcanzar la órbita terrestre y el Sputnik 22 no la superó. La NASA se unió en 1964 en la exploración de Marte lanzando el Mariner 3 sin éxito.

El primer éxito vino de mano del Mariner 4, enviado por la NASA en 1965. Esta sonda consiguió enviar 21 fotos del planeta rojo a la Tierra. A su vez, la URRSS seguía haciendo intentos de llegar al planeta, todos ellos sin éxito. La NASA mandó en los siguientes años los Mariners 6 y 7, que enviaron otra docena de fotos. Estas sondas sobrevolaron áreas de Marte que estaban formadas por cráteres, por lo que se pensó erróneamente que Marte se parecía a la Luna.

Fue en 1971 cuando la Unión Soviética consiguió su objetivo y llegó a la órbita de Marte con el Mars 2, aunque desgraciadamente, la sonda se estrelló contra la superficie. La sonda hermana, Mars 3, llegó unos años después y solo duró encendida unos segundos.

Cuando en 1971 la NASA mandó el Mariner 9, la imagen que se tenía de Marte cambió, ya que esta sonda llegó al planeta en medio de una tormenta de arena. Al finalizar la tormenta, los científicos descubrieron volcanes inactivos y una grieta en la superficie de Marte. La sonda estuvo activa casi un año y mandó más de 7000 fotos de planeta.

En 1975 la NASA mandó un par de sondas, ambas compuestas por sondas orbitales y de aterrizaje, Viking 1 y Viking 2, ambas aterrizando en Marte exitosamente. Los resultados que trajeron estas sondas a la Tierra aún son temas de controversia. Aunque en un principio se descartó a través de las muestras obtenidas que pudiese haber existido vida en Marte, a medida que se estudia la actividad microbiológica, la incertidumbre acerca de los resultados aumenta. Estas sondas también tomaron medidas de la composición atmosférica, lo que llevó a concluir que algunos meteoritos encontrados en la Tierra tendrían su origen en el planeta Rojo, debido a su similar composición.



*Fig 2.3.1. Primera foto “clara” de la superficie de Marte tomada por el Viking 1 (Fuente: NASA via [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_910.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_910.html))*

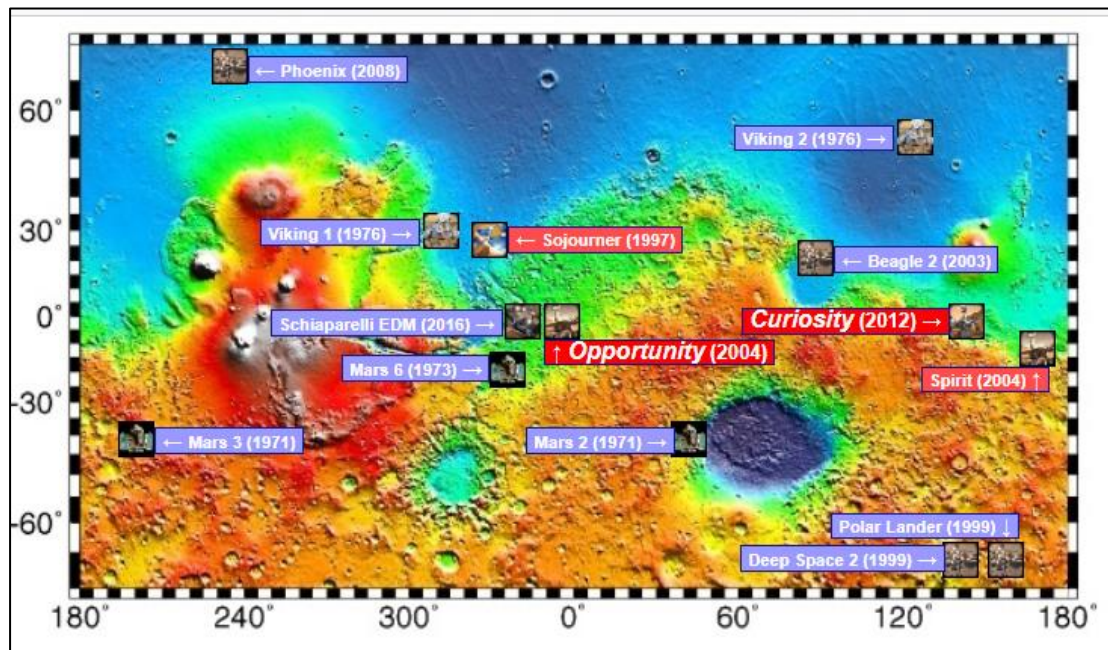
Las misiones de la Unión Soviética, esta vez con Phobos, seguían fallando. Lo mismo pasó con el Mars Observer, que se lanzó hacia Marte en 1992 y fue perdido antes de llegar a órbita. El hecho de perder una misión que había costado 813 millones de dólares a la NASA hizo, entre otras cosas, que se empezase a pensar en misiones más “baratas, rápidas y mejores” (FBC) que basarían sus bajos costes y rapidez en los avances en la electrónica y nuevas técnicas de dirección de equipos. La primera misión de este tipo fue un éxito tras el aterrizaje de la sonda de aterrizaje Pathfinder y el rover Sojourner en 1997, siendo este el primer rover en rodar por la superficie marciana.

En 2001 Mars Odyssey aterrizó en Marte, orbitando aún el planeta. Desde que llegó a Marte- Este orbitador contaba con un espectrómetro de rayos gamma que detectó importantes niveles de hidrógeno y de regolito en el planeta. Además, ha enviado unas 350000 imágenes y retransmitido un alto porcentaje de los datos de los rovers Spirit and Opportunity. Estos fueron enviados a Marte en 2004 y ambos han probado que hay una gran seguridad de que en un pasado fluyese agua en Marte.

Posteriormente en 2005, la NASA lanzó el orbitador Mars Reconnaissance, el cual ha obtenido más datos que todas las misiones anteriores a Marte juntas. En 2007, se lanzó el Mars Phoenix, que descubrió agua helada en la superficie de Marte. Tras una tormenta de arena, los paneles solares del Phoenix se dañaron gravemente y se perdieron las comunicaciones.

En 2012 el rover Curiosity llegó al cráter Gale para buscar signos de posibles medios habitables. El rover descubrió huellas de antiguas zonas con agua, metano en la superficie y diferentes componentes orgánicos. Como evolución de este rover y como parte de la misión Mars One, el rover Mars 2020 continuará con una investigación más avanzada

cuando alcance el planeta. A su vez, MAVEN, en órbita desde 2014, busca cambios en la atmósfera de Marte para entender porque ha ido disminuyendo con los años.



*Fig 2.3.2. Localización de las diferentes misiones enviadas a Marte*

En cuanto al futuro más cercano en Marte, la NASA ocupa el puesto principal en términos de colonización del planeta, con su programa Mars One, que planea construir un asentamiento humano en Marte. El proyecto se fundó en 2011 y ya ha iniciado alguna de sus fases, como la selección mundial de los candidatos que viajarán al planeta. Durante el año actual, el 2018, comenzará el entreno de los astronautas que participarán en la misión, aprendiendo tanto a reparar los componentes que formen el asentamiento, como conocimientos médicos y de supervivencia. En cuanto a fases posteriores de la misión:

- 2022: se llevará a cabo una fase de demostración para probar que las tecnologías con las que se pretende trabajar en Marte se pueden llevar a cabo en el planeta (extracción de agua, funcionamiento de los paneles solares, etc.)
- 2024: puesta en órbita del satélite de comunicaciones.
- 2026: lanzamiento del Rover en busca de la mejor localización para el asentamiento y puesta en órbita solar de un segundo satélite.
- 2029-2030: preparación del asentamiento antes de la llegada de los astronautas.
- 2031: comienzo del viaje de la primera tripulación que poblará Marte.

### 2.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL PLANETA

Marte es un planeta similar a la Tierra y un gran candidato a albergar vida humana debido a las condiciones que se dan en este.

Marte tiene características y condiciones muy similares a la Tierra, pero el tamaño y masa del planeta no son una de ellas. El tamaño de Marte es menor al de la Tierra; mientras que esta última tiene un diámetro en el Ecuador de 12,756 km, Marte cuenta con un diámetro de 6,794km, es decir, la Tierra tiene aproximadamente el doble de tamaño que el planeta rojo. En cuanto a la masa y gravedad de los planetas también difieren, siendo la masa de Marte el 10,7% de la masa del planeta Tierra; y la gravedad en Marte un 38% de la que existe en la Tierra. Este hecho hará que construir un asentamiento en Marte se complique ya que el hecho de que la gravedad sea menor en Marte hará que sea más difícil mantener la instalación anclada al suelo planetario.

La rotación de ambos planetas es similar, haciendo que los días tengan duraciones casi iguales. Un día en el planeta Rojo equivale a 24 horas 39 minutos y 35 segundos. Esta similaridad contribuye a que la temperatura que se da durante el día y la noche no sufra variaciones extremas, mejorando las condiciones para que se desarrolle vida en el planeta. En cuanto a la órbita, Marte tarda 687 días en dar una vuelta alrededor del Sol, en contraste a los 365,25 días que dura un año terrestre. Esto se debe a que Marte se encuentra aproximadamente a 228 millones de kilómetros del Sol, mientras que la Tierra está a unos 150 millones de kilómetros de este.

Según la NASA, la atmósfera de Marte se compone principalmente de dióxido de carbono (95,32%), nitrógeno (2,7%), argón (1,6%) y monóxido de carbono (0,08%). Un ser humano no podrá estar en contacto directo con la atmósfera del planeta Rojo. En primer lugar, esta está compuesta por monóxido de carbono, un gas completamente tóxico para el ser humano. Además, los gases de la atmósfera deberán ser transformados mediante distintas reacciones en un gas apto para el ser humano.

La presión de la atmósfera oscila entre los 30 y los 1200 Pa, mientras que en la Tierra alcanza un valor de 101,3 kPa a nivel del mar. Es decir, la presión atmosférica en Marte es infinitamente más baja que lo que es en la Tierra, por lo que un humano sin un traje especial que varíe la presión perdería el conocimiento en apenas segundos.

En cuanto a las temperaturas, Marte se mueve en un rango que oscila entre los -140°C y los 20°C. Tal y como se muestra en la figura 2, un ser humano solo podría sobrevivir

dentro de un pequeño intervalo de temperaturas dentro de las que el planeta presenta. Aunque el ciclo solar del planeta rojo es similar al de la Tierra, la órbita es más excéntrica, lo que provoca que sus temperaturas sean más extremas. El hecho de encontrarse a una distancia del Sol mayor influye también en que alcance temperaturas mucho más bajas. Las bajas temperaturas, junto con la fina atmósfera, hace que encontrar agua en estado líquido sea casi imposible.

A pesar de tener una atmósfera mucho menos densa que la de la Tierra, esta es capaz de soportar fenómenos atmosféricos, como vientos y nubes, en su interior. Marte posee las tormentas de arena más intensas del sistema solar, capaces de cubrir todo el planeta durante meses. Pese al tamaño de estas, no son peligrosas por sus corrientes de viento, ya que la baja presión y la densidad del aire, hace que las cargas que estas crean sean mínimas.

Geológicamente, Marte es un planeta prácticamente muerto, aunque se sabe que, en el pasado, tuvo una actividad geológica importante, que le hacía capaz de regenerar recursos.

La fina atmósfera de Marte y la ausencia de un campo magnético que lo proteja del viento solar hace que los niveles de radiación sean más elevados que en la Tierra.

### **2.3.3. RIESGOS PARA EL SER HUMANO EN MARTE**

El espacio es un lugar peligroso al igual que desconocido para el ser humano. Una gran lista de factores hace que tanto explorarlo, como vivir en otro lugar que no sea la Tierra, tengan una serie de riesgos que se deben mitigar para hacerlo posible.

En primer lugar, la gravedad de Marte es un tercio de la que existe en la Tierra, por lo que el cuerpo experimentará un cambio grande entre ambos planetas, sufriendo una transición difícil de sobrellevar. La gravedad afecta a la orientación espacial, la coordinación motora, e incluso puede dar lugar a grandes mareos. La ausencia de una fuerza mayor hace que los fluidos corporales tengan dificultad para ser bombeados a las partes del cuerpo más alejadas del corazón y que se desplacen hacia arriba provocando problemas de visión y grandes dolores de cabeza. Además, el cuerpo humano expuesto a grandes estancias en ambientes con baja gravedad, como es el caso de Marte, se verá expuesto a una pérdida de densidad ósea a un ritmo de un 1% mensual, comparado con el 1% de pérdidas anuales que experimenta en la Tierra. Del mismo modo, los músculos se debilitan y pierden fuerza, ya que los esfuerzos que se han de realizar con estos valores



de gravedad son mucho menores. Para contrarrestarlo, es necesario realizar esfuerzos físicos diariamente.

Otro de los factores que afectarán a la vida en Marte es el clima, con una temperatura media de unos  $-62^{\circ}\text{C}$ , con temperaturas demasiado frías durante la noche. La solución a este problema estará en construir el asentamiento lo más cerca del ecuador posible, donde las temperaturas son más cálidas; y en proteger adecuadamente a los astronautas del frío del exterior. A esto se le unen las tormentas de arenas frecuentes en el planeta, obligando a construir una estructura lo suficientemente resistente al desgaste que estas ocasionarían.

La falta de presión atmosférica hace que el agua sea capaz de hervir a  $37^{\circ}\text{C}$ , ocurriendo un hecho similar con la sangre, por lo que los astronautas deberán llevar continuamente un traje espacial preparado para evitar que la sangre hierva y los órganos exploten. La fina atmósfera de Marte hace también que no filtre suficientemente los rayos solares y la radiación alcance más del doble de la que existe en la Tierra. Al carecer de campo magnético, además, el planeta está desprotegido contra eventos de Protones Solares. La radiación es así un riesgo a largo plazo para la vida de los astronautas, ya que estarán expuestos durante un largo periodo de tiempo a altos niveles de radiación incrementando el riesgo de sufrir alguna enfermedad cancerígena.

## **2.4. RADIACIÓN**

Se define como radiación la emisión o transmisión de energía en forma de ondas o partículas de gran velocidad a través del espacio o de un medio material, incluyendo la radiación electromagnética (ondas de radio, microondas, radiación gamma), radiación de partículas, acústica y gravitacional.

La materia está formada por átomos, que a su vez están constituidos por protones (carga eléctrica positiva) y neutrones en el núcleo, y electrones (carga negativa) orbitando alrededor de este. Normalmente, el número de protones y electrones de los átomos es el mismo, produciendo un balance energético y formando un átomo estable. Sin embargo, existen ciertos núcleos atómicos inestables en el que las cargas negativas no son iguales a las positivas, por lo que son proactivos a emitir partículas cargadas o a romperse en núcleos más pequeños. Estos reciben el nombre de radionucleidos y si a medida que se produce la desintegración interaccionan con otro átomo o molécula liberando un electrón, se dice que se produce la ionización.

Dependiendo en la cantidad de energía que se irradie, la radiación es considerada ionizante o no ionizante, la primera supera valores de 10Ev, provocando graves daños en los seres vivos.

### 2.4.1. FUENTES DE RADIACIÓN EN EL ESPACIO

En el espacio la radiación consiste básicamente en radiación ionizante, aquella que tiene suficiente energía para liberar electrones de los átomos y moléculas (por ionización). Algunas de las partículas que forman este tipo de radiación son los rayos gamma, protones y neutrones presentes en el espacio; partículas con altos niveles energéticos frente a los que hay que proteger a los seres humanos.

La radiación en el espacio puede provenir tanto del interior como del exterior del Sistema Solar, aunque existen tres fuentes principales: radiación de los rayos cósmicos (GCR), radiación de eventos solares (ESP) y radiación proveniente de los cinturones de radiación terrestres.

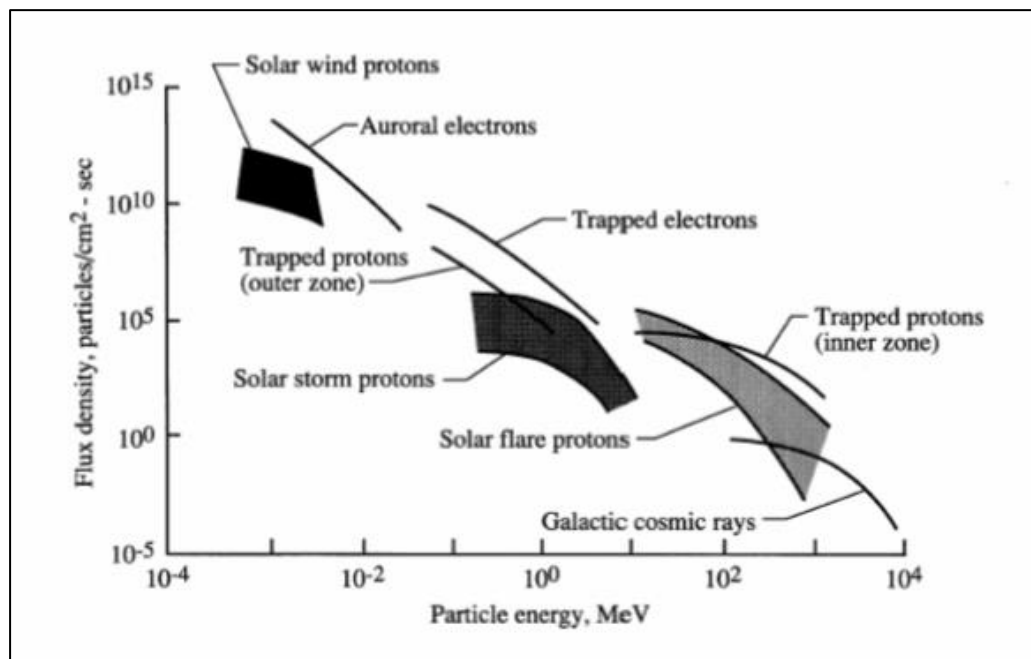


Fig 2.4.1. Fuentes de radiación en el espacio (Fuente: NASA-STD-3000 154)

#### 2.4.1.1. RADIACIÓN CÓSMICA (GCR)

Los rayos cósmicos están formados por protones y núcleos atómicos cuyos electrones se han separado en su paso a altas velocidades por la galaxia. Según los datos que recogió en telescopio Fermi Space en 2013, se cree que estos se crearon hace millones de años debido a la explosión de una supernova y han ido acelerándose a lo largo de los últimos



millones de años, llegando al Sistema Solar atraídos por el campo magnético de la galaxia. Es decir, los rayos cósmicos no se crean en el Sistema Solar, pero sí que mayoritariamente dentro de la Vía Láctea.

Al interactuar con el gas presente en el espacio, los rayos cósmicos emiten rayos gamma, lo que permite detectar dicha radiación en la Vía Láctea.

Los rayos cósmicos que llegan al campo magnético de la Tierra están compuestos por un 85% de hidrógeno (protones), 14% helio y un 1% de partículas HZE (carbono, hierro, níquel), altamente energéticas y cargadas. Aunque estos incluyen casi todos los elementos naturales, no todos ellos son importantes a la hora de evaluar su radiación.

El principal riesgo que supone este tipo de radiación es el alto valor energético que tienen. En 1991 se detectó un protón que viajaba a 0,0999 el valor de la velocidad de la luz, cuya energía cinética rondaba los  $3 \times 10^{20}$  eV. Aun así, generalmente las partículas de rayos cósmicos tienen energía cinética de alrededor de 0,3 GeV.

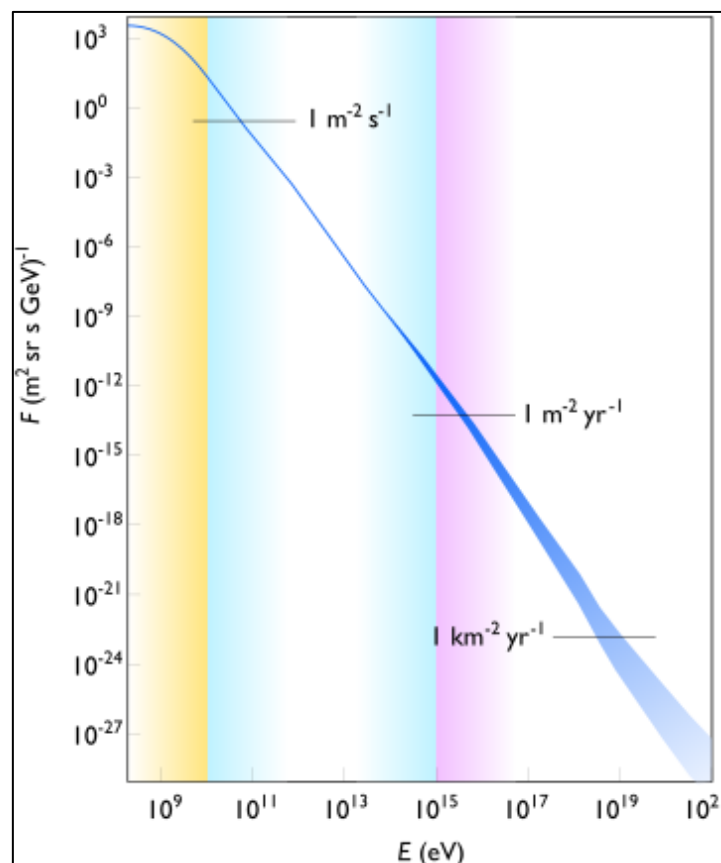


Fig 2.4.2. Flujo de GCR en función de su energía (Fuente: S. Swordy, *The energy spectra and anisotropies of cosmic rays*, 2001)

### 2.4.1.2.EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES (ESP)

Los eventos de partículas solares tienen su origen en el Sol. Estos ocurren cuando partículas solares, principalmente protones, pero también alguna partícula Alpha y núcleos pesados, son expulsadas a altísimas velocidades hacia el espacio debido a las interacciones del campo magnético solar, las fulguraciones y las eyecciones de masa coronal.

Las fulguraciones solares son grandes explosiones de energía en la superficie del Sol y pueden durar desde un par de minutos o permanecer activas durante días. Estas son causantes de emisiones de altos niveles energéticos al espacio.

Por otro lado, las eyecciones de masa coronal producen eventos más lentos y son eyecciones que comprenden un periodo más largo de tiempo en el que parte de la corona solar es arrojada al espacio.

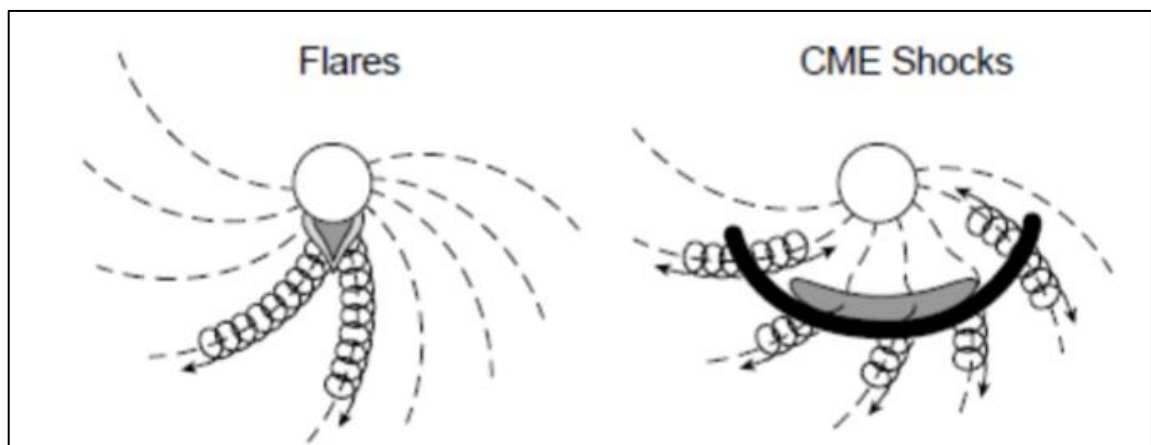


Fig 2.4.3. Diferencia entre fulguraciones y eyecciones de masa coronal (Fuente: Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space)

Los eventos solares van unidos a energías de unos 10 MeV provocando que los protones penetren en el campo magnético terrestre y se ionicen. Los protones más cargados energéticamente pueden alcanzar la Tierra en 10 minutos desde que se produce el evento solar.

Aunque los efectos en el ser humano y en equipos tecnológicos son muy nocivos, los EPS no suelen alcanzar el planeta Tierra con mucha frecuencia.

En periodos de máxima actividad solar, el Sol puede generar varios EPS al día, aunque suelen estar más relacionados con el ciclo solar que dura 11 años, de los cuales 4 años se consideran inactivos y los 7 restantes son de máxima actividad.

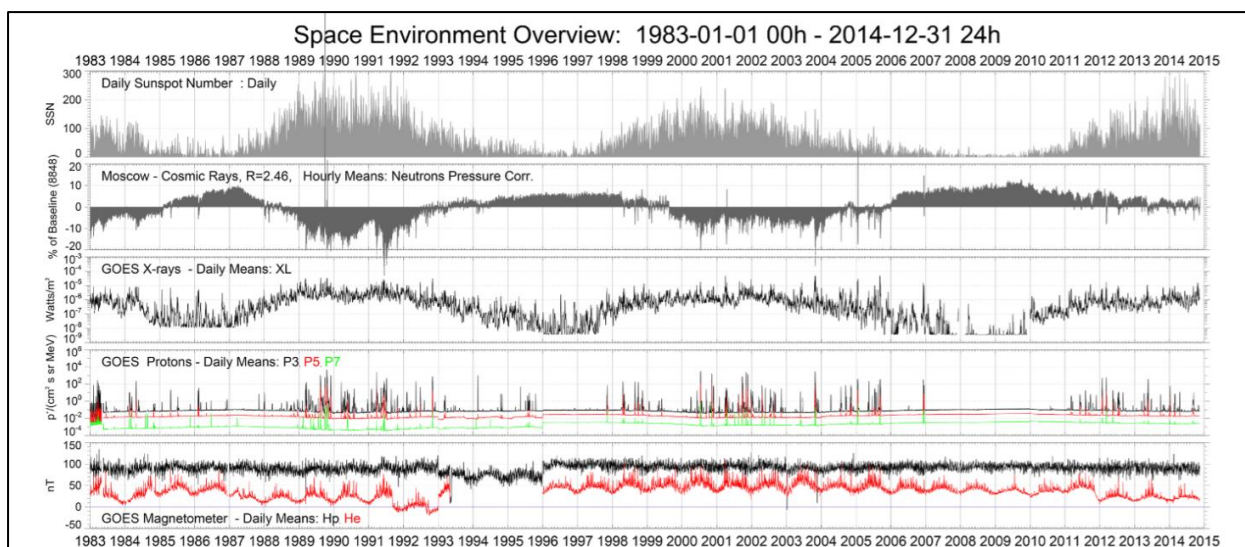


Fig 2.4.4. Relación entre el ciclo solar y los GCR (Fuente: *Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space*)

En la figura se puede observar la relación existente entre los períodos de máxima actividad durante los tres últimos ciclos solares y la intensidad de los rayos cósmicos, así como la intensidad del flujo de protones y rayos-x, relacionados con los ESP. La magnitud de estos eventos viene dada por el flujo de rayos x medido en cada momento, pudiendo clasificar los eventos en diferentes categorías dependiendo de su magnitud, siendo las clases M y X los más potentes. Además, aparte de la emisión de rayos x, existen casos en el que los protones son las partículas que dominan el evento solar.

Hasta el momento, el mayor evento solar detectado se dio en 1859, conocido con el evento Carrington, alcanzando una fluencia de protones de 30 MeV de unos  $1,88 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Este evento provocó fallos en los sistemas tecnológicos de parte del hemisferio norte y llegó a producir auroras boreales en Norte América.

### 2.4.1.3. CINTURONES DE RADIACIÓN

Los cinturones de radiación terrestres, también denominados cinturones de Van Allen, no son una fuente de radiación en sí, sino que son dos zonas de la magnetosfera terrestre encerradas en el campo magnético de la Tierra. Fueron descubiertos en 1958 por el satélite Explorer 1.

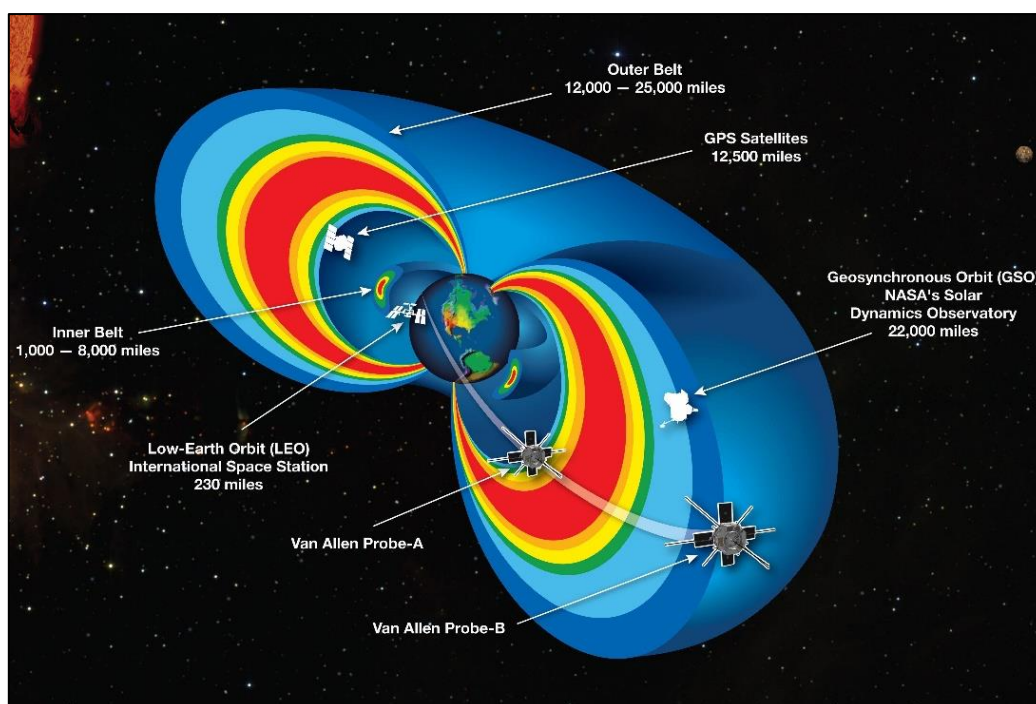


Fig 2.4.5. Cinturones de Van Allen (Fuente: NASA vía [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html))

El cinturón interior se extiende desde los 1000 km sobre la superficie terrestre hasta los 5000 km, mientras que el cinturón exterior va desde los 15000km hasta aproximadamente 20000km. El primero está formado principalmente por protones energéticos, mientras que el segundo lo forman en su mayoría electrones con altos niveles de energía.

Existe una parte del cinturón interior llamada Anomalía del Atlántico Sur (AAS) en la cual los niveles radiactivos son más altos, resultando un peligro para las naves que la atraviesen, pudiendo afectar gravemente a los equipos electrónicos y los seres humanos.

Los cinturones de Van Allen están formados por viento solar y rayos cósmicos que han quedado atrapados por el campo magnético, y sus energías no suelen superar los 100 MeV.

## 2.4.2. MAGNITUDES EN LA RADIACIÓN

Cuando se quiere medir la cantidad de líquido que necesita un ser humano al día para sobrevivir se hace referencia a la dosis (litros) necesarios, lo mismo pasa con magnitudes como la temperatura o la velocidad. No ocurre lo mismo cuando se quieren analizar los efectos de la radiación en el ser humano. A la hora de medir la radiación se han desarrollado magnitudes dosimétricas especiales, basadas principalmente en la medición de la energía depositada en órganos y tejidos del ser humano.

La radioactividad se ocasiona debido a la desintegración de núcleos radioactivos, ya sea de forma espontánea o intencionada. Esta es la magnitud que define la tasa de radiación emitida.

La unidad de radioactividad que se usa en el sistema internacional (SI) es el Becquerel (Bq).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/segundo} \quad (2.1)$$

En el sistema convencional de unidades (CS), la unidad de medida de la radioactividad es el Curio (Ci).

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegraciones} \quad (2.2)$$

Para calcular la actividad es necesario conocer antes la vida media del elemento radioactivo, es decir, el tiempo en el que la mitad de un conjunto de núcleos radioactivos se desintegra. La vida media puede variar desde segundos hasta millones de años.

Elemento	Vida media
<sup>15</sup> O (Oxígeno 15)	122 segundos
<sup>222</sup> Rn (Radón 222)	3,8 días
<sup>131</sup> I (Yodo 131)	8 días
<sup>90</sup> Sr (Estroncio 90)	29,1 años
<sup>137</sup> Cs (Cesio 137)	30 años
<sup>14</sup> C (Carbono 14)	5730 años
<sup>41</sup> Ca (Calcio 41)	103000 años
<sup>40</sup> K (Potasio 40)	1,3 millones de años
<sup>235</sup> U (Uranio 235)	103,8 millones de años

Tabla. 2.4.1. Vida media de diversos elementos

La vida media de un elemento se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Donde  $\lambda$  es la constante de desintegración y muestra la probabilidad de que un nucleido se desintegre por segundo. La actividad del elemento radioactivo se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$A = \lambda * N = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Siendo N el numero de núcleos desintegrados.

Otra magnitud que hay que tener en cuenta es la exposición a esta, es decir, la cantidad de radiación que viaja por el aire, o la capacidad de ionización que posee un haz de radiación para crear cargas eléctricas que pueden ser recogidas y medidas. En el CS la unidad es el Roentgen €, la cual puede definirse como la cantidad de radiación gamma o X que produce una unidad electroestática de carga en 1cm<sup>3</sup> de aire seco a presión y temperatura estándar. Actualmente, se usa el Culombio/Kilogramo (C/Kg) definida por el SI.

$$1 R = 2,58 \times 10^{-4} \frac{C}{Kg} \text{ (condiciones normales de P y T)} \quad (2.5)$$

Finalmente, para conocer y poder analizar los efectos de la radiación sobre el ser humano, existe una magnitud que mide la cantidad de energía absorbida por un cuerpo. Esta magnitud recibe el nombre de dosis radiactiva y puede ser medida de tres formas: dosis absorbida, dosis equivalente y dosis efectiva.

La dosis absorbida (D) mide la cantidad de energía que es cedida por la fuente de radiación ionizante a una unidad de masa de un material, en el caso del ser humano, en el tejido biológico. La unidad de medida del SI es el Gray (Gy) y equivale a 1 Kg de material que ha absorbido una energía de 1 Julio. En el CS se utilizaba el rad (radiation absorbed dose).

$$1 Gy = 100 rad \quad (2.6)$$

Para medir la dosis absorbida es necesario conocer otros tres parámetros: el número de partículas o la cantidad de energía que atraviesa el medio (fluencia), la cantidad de energía transferida por las partículas iniciales a las partículas del medio (kerma) y el ritmo al que la energía es transferida al medio. La fluencia  $\phi$ , definida como el numero

Donde  $\phi$  es el número de partículas que inciden en una esfera de sección transversal  $A$ . Al usar una esfera, se tiene en cuenta todas las partículas que atraviesen el área perpendicular a la dirección de cada partícula. La fluencia energética  $\psi$  se puede relacionar con la fluencia mediante la siguiente expresión:

$$\psi = \phi * E \quad (2.7)$$

El kerma se define como la energía media cinética transferida de partículas sin carga a partículas cargadas en una masa determinada de un material.

$$K = \frac{d\overline{E}_{tr}}{dm} \quad (2.8)$$

Por tanto, la dosis absorbida puede calcularse a través de la fórmula:

$$D = \frac{d\overline{\epsilon}}{dm} \quad (2.9)$$

Donde  $d\overline{\epsilon}$  es la energía media comunicada a una masa específica, siendo la energía comunicada igual a la energía incidente menos la energía que se libera al medio.

Esta magnitud no tiene en cuenta el órgano o tejido que absorbe la radiación, por lo que no es precisa con los efectos biológicos de la radiación. 1 Gy de radiación alfa puede ser mucho más nocivo que 1 Gy de rayos X, por lo que para ser más exactos a la hora de medir el riesgo que conlleva una fuente de radiación se utilizan la dosis equivalente (H) y la dosis efectiva  $E$ , que tienen en cuenta determinados factores que modifican la dosis absorbida.

La dosis equivalente (H) mide el efecto de la radiación sobre una porción de materia, es decir, valora los efectos biológicos de una determinada dosis absorbida por los tejidos biológicos. La dosis absorbida mide la energía que se cede al tejido, mientras que la dosis equivalente mide el impacto que la radiación tiene sobre el tejido. La unidad utilizada por el SI para medir la dosis equivalente es el Sievert (Sv), mientras que antiguamente se utilizaba el rem.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (2.10)$$



La relación entre la dosis absorbida y la dosis equivalente es proporcional a un factor de calidad que depende del tipo de radiación.

$$H = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.11)$$

Donde  $w_R$  es un factor de ponderación del elemento radiactivo.

Tipo de radiación	Factor de ponderación de la radiación $w_R$
Fotones	1
Electrones <sup>a</sup> y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa ,Fragmentos de fisión, lones pesados	20
Neutrones	Una función continua de la energía del neutrón (ver Figura 1 y Ecuación. 4,3)

*Todos los valores están relacionados a la radiación incidente en el cuerpo o, para las fuentes de radiación internas, emitidas por radionucleido(s) incorporado(s).*

*<sup>a</sup> Tener en cuenta el tema especial de los electrones Auger discutido en el párrafo 116 y en el Apartado B.3.3 del Anexo B*

Tabla. 2.4.2. Factores de ponderación de la radiación recomendados (Fuente: ICRP 103)

En el caso de los neutrones, el factor de ponderación está relacionado con la energía de estos. La eficacia biológica de neutrones incidentes en el cuerpo humano depende fuertemente de la energía del neutrón, por lo que el factor de ponderación refleja perfectamente dicha eficacia.

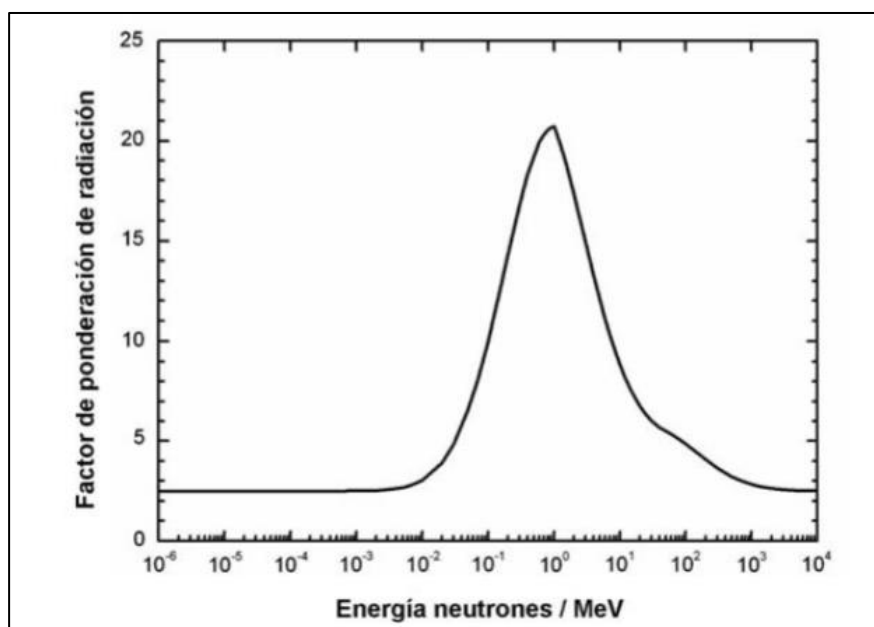


Fig 2.4.6. Factores de ponderación de radiación de neutrones en función de su energía (Fuente: ICRP 103)



En la ICRP 60 (1991) el factor de ponderación para los neutrones se definía por una función escalón. Actualmente, este viene definido por una función continua como muestra la figura.

La dosis efectiva  $E$  tiene en cuenta tres factores: la dosis absorbida por todos los órganos del cuerpo humano, el nivel de riesgo que tiene la fuente de radiación y la sensibilidad de cada órgano frente a la radiación. Este valor diferencia la sensibilidad de cada órgano a ser expuesto a radiación. Esta magnitud viene dada por la sumatoria de dosis equivalentes en tejido multiplicada cada una por el factor de ponderación para cada tejido.

$$E = \sum_T w_T * H_T \quad (2.12)$$

Siendo  $H_T$  la dosis equivalente en el tejido y  $w_T$  el factor de ponderación de cada tejido. Por tanto, la dosis equivalente:

$$E = \sum_T w_T * \sum_R w_R * D_{T,R} \quad (2.13)$$

Donde  $w_R$  es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación  $R$  y  $D_{T,R}$  la dosis absorbida media en el órgano o tejido.

El factor de ponderación de los diferentes tejidos se ha determinado a partir de estudios epidemiológicos, calculando la probabilidad que ciertos niveles de radiación en un órgano o tejido ocasionen un cáncer. Estos han sido calculados para una persona de referencia definida por la CIPR y la Sociedad de Medicina Nuclear Americana, y van variando a medida que se obtienen nuevos datos.

Tejido	$w_T$	$\sum w_T$
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos *	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04
Total		1,00

\* Resto de los Tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix

Tabla. 2.4.3. Factores de ponderación de los tejidos recomendados (Fuente: ICRP 103)

Realmente, tanto la dosis efectiva como la dosis equivalente no son magnitudes medibles, si no que sus valores se calculan a partir de coeficientes que las relacionan con las magnitudes medibles. Estos coeficientes se calculan con la ayuda de maniqués computacionales, modelos biocinéticos y datos fisiológicos de referencia. Se establecen así maniqués computacionales del Hombre de Referencia y la Mujer de referencia, ambos con características anatómicas y fisiológicas definidas, para el cálculo de dichas dosis.

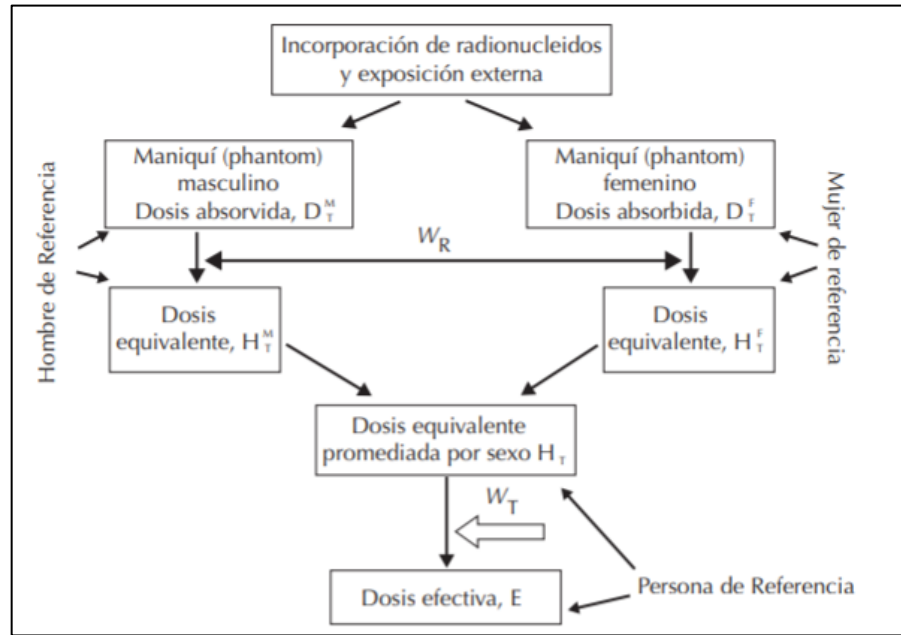


Fig 2.4.7. Cálculo de la dosis efectiva mediante la ponderación del género (Fuente: ICRP 103)

Una vez determinadas las dosis equivalentes para ambos géneros, conviene hacer un cálculo de la dosis efectiva promedio aplicable a ambos sexos. La dosis efectiva se calcula entonces a partir de las dosis equivalentes del Hombre y la Mujer de Referencia:

$$E = \sum_T w_T \left[ \frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right] \quad (2.14)$$

Existe una magnitud colectiva que mide la exposición de un conjunto de individuos durante un determinado periodo de tiempo. La dosis equivalente colectiva (S) es así la suma de las dosis efectivas individuales durante el periodo de tiempo que dura la exposición. Esta se mide en sievert persona.

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left( \frac{dN}{dE} \right)_{\Delta T} dE \quad (2.15)$$

En resumen, la naturaleza de la radiación viene determinada por distintos parámetros, resumiendo:

Parámetro	Radioactividad	Dosis absorbida	Dosis equivalente	Exposición (rayos x y rayos gamma)	Energía
<b>Definición</b>	Tasa de emisión radioactiva (transformación o desintegración) de una sustancia radioactiva	Energía irradiada por unidad de masa del material absorbente	Expresión de la dosis en función del efecto biológico	Cantidad que muestra la habilidad de la radiación para ionizar el aire y por tanto crear cargas eléctricas coleccionables y medibles	
<b>Unidades de medida del SI</b>	Becquerel (Bq) 1 Bq = 1 evento de emisión radioactiva por segundo	Gray (Gy) 1 Gy = 100 rad	Sievert (Sv) 1 Sv = 1000 rem	Coulomb/kilogramo (C/Kg) 1R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg aire	Electronvoltio (eV)
<b>Unidades de medida comunes</b>	Curie (Ci)	rad	rem	Roentgen (R)	Julio (J)

*Tabla. 2.4.4. Principales parámetros para monitorizar la radiación.*

Lo más importante a tener en cuenta es que la misma dosis de tipos diferentes de radiación ocasiona distintos daños, los cuales se ven reflejados mediante el uso de la dosis equivalente. Por ejemplo, las partículas Alpha (núcleos de helio) tienen efectos más nocivos que las partículas beta, los rayos-x o los rayos gamma.

### 2.4.3. EFECTOS DE LA RADIACIÓN ESPACIAL EN EL SER HUMANO

El ser humano está expuesto a diversas fuentes de radiación. Cuando las dosis de radiación superan determinados niveles pueden existir diversos peligros para la salud, como la caída del cabello o quemaduras por radiación. A su vez, cuando las dosis de radiación son bajas pero el período de exposición a esta es muy prolongado, pueden existir efectos a largo plazo, como es el caso del cáncer.

Los daños que pueden ocasionar las partículas radioactivas dependen de la dosis absorbida (D). Para tener en cuenta el tipo de radiación y la sensibilidad de los órganos o tejidos afectados se usa es su lugar la dosis efectiva (E).

La radiación es así uno de los mayores desafíos que hay que afrontar a la hora de enviar al ser humano al espacio. El objetivo siempre poder llevar a cabo la exploración del espacio sin exceder límites aceptables de exposición a la radiación.

La NASA lleva más de 35 años recolectando y monitorizando información relacionada con las dosis que reciben los astronautas que han ido participando en diversas misiones. Aun así, la información sigue siendo escasa, por lo que se han desarrollado diversos

modelos para evaluar los riesgos que conlleva la radiación y los efectos que puede tener sobre la salud del ser humano.

En 2010 la NASA desarrolló un método para evaluar los riesgos que puede ocasionar la radiación en el espacio llamado NASA Space Cancer Risk Model-2010 (NSCR-2010). Este modelo fue revisado posteriormente en 2012 para incluir estudios epidemiológicos con análisis y datos más recientes.

A diferencia de la radiación a la que está expuesto el ser humano en la Tierra, en el espacio exterior, los astronautas están expuestos principalmente a rayos cósmicos (GCR) y eventos de partículas solares (ESPs). Estos desempeñan un alto riesgo para el ser humano y para el desarrollo de las misiones espaciales. Los riesgos a los que se puede ver expuesto un ser humano debido a estas fuentes de radiación pueden ser el desarrollo de cáncer, degeneración de diversos órganos o incluso daños en el sistema nervioso central (CNS).

La NASA ha establecido un requisito conocido como el 3% REID, una medida que cuantifica el riesgo de muerte por exposición directa (REID) para limitar estos riesgos. Para determinar los límites de edad y género de exposición a la radiación se utiliza un criterio de un 3% de probabilidad, mientras que para proteger de las incertidumbres que posee el modelo de proyección de riesgos se usan intervalos de confianza de un 95%.

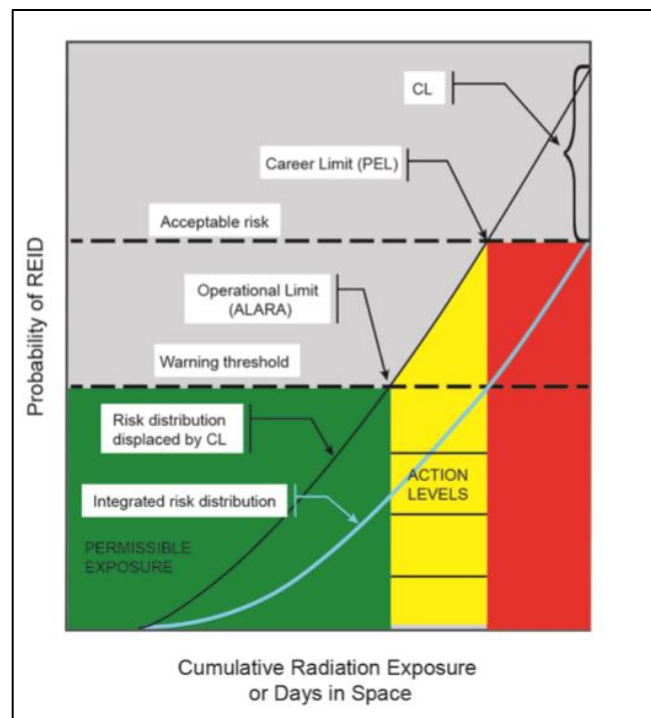


Fig 2.4.8. Distribución acumulada de exposición a la radiación para un nivel aceptable de riesgo.

La incertidumbre ligada a la evaluación del riesgo viene dada principalmente por el desconocimiento de los efectos biológicos que pueden tener ciertos elementos como el hidrógeno, el helio o los nucleidos HZE, así como los iones de elementos pesados, entre otros.

La tasa de incidencia instantánea de cáncer,  $\lambda(t)$ , viene definida en función de la probabilidad de una función  $F(t)$  que muestra el tiempo hasta que ocurre el cáncer. La función de supervivencia,  $S(t)$ , define la probabilidad de no haber desarrollado un cáncer a la edad  $t$  (dado por la función  $1-F(t)$ ).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.16)$$

El riesgo acumulado,  $\Lambda(t)$ , viene dado por la tasa de incidencia acumulada:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) dz \quad (2.17)$$

Y la probabilidad de supervivencia está directamente relacionada con el riesgo acumulado, por la función:

$$S(t) = \exp[-\Lambda(t)] \quad (2.18)$$

El riesgo de muerte por exposición a la radiación (REID) viene dado pues por la probabilidad sobrevivir, representada por la función  $S_0(t)$ , y por la tasa de riesgo a morir a causa de un cáncer,  $\lambda_M$ , integrado a lo largo de la vida restante.

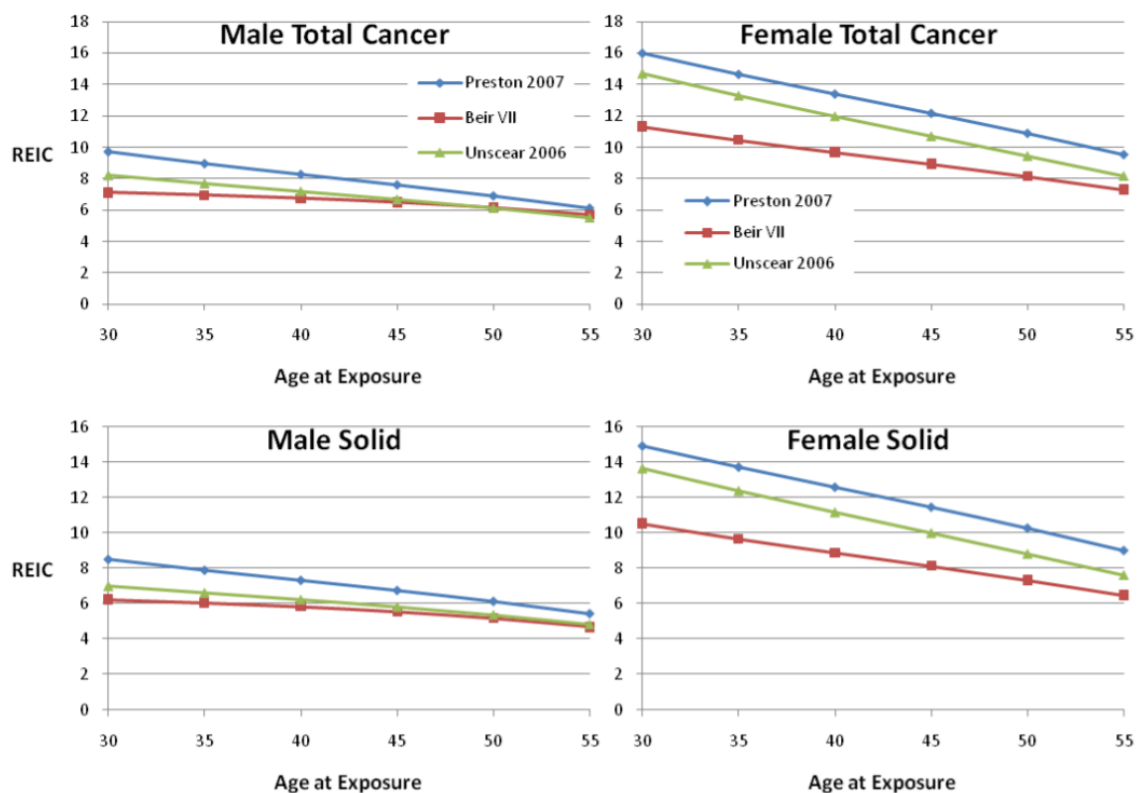
$$REID(a_E, D) = \int_{a_E} dt \lambda_M(a, a_E, D) S_0(t) e^{-\int_{a_E}^t dz \lambda_M(z, a_E, D)} \quad (2.19)$$

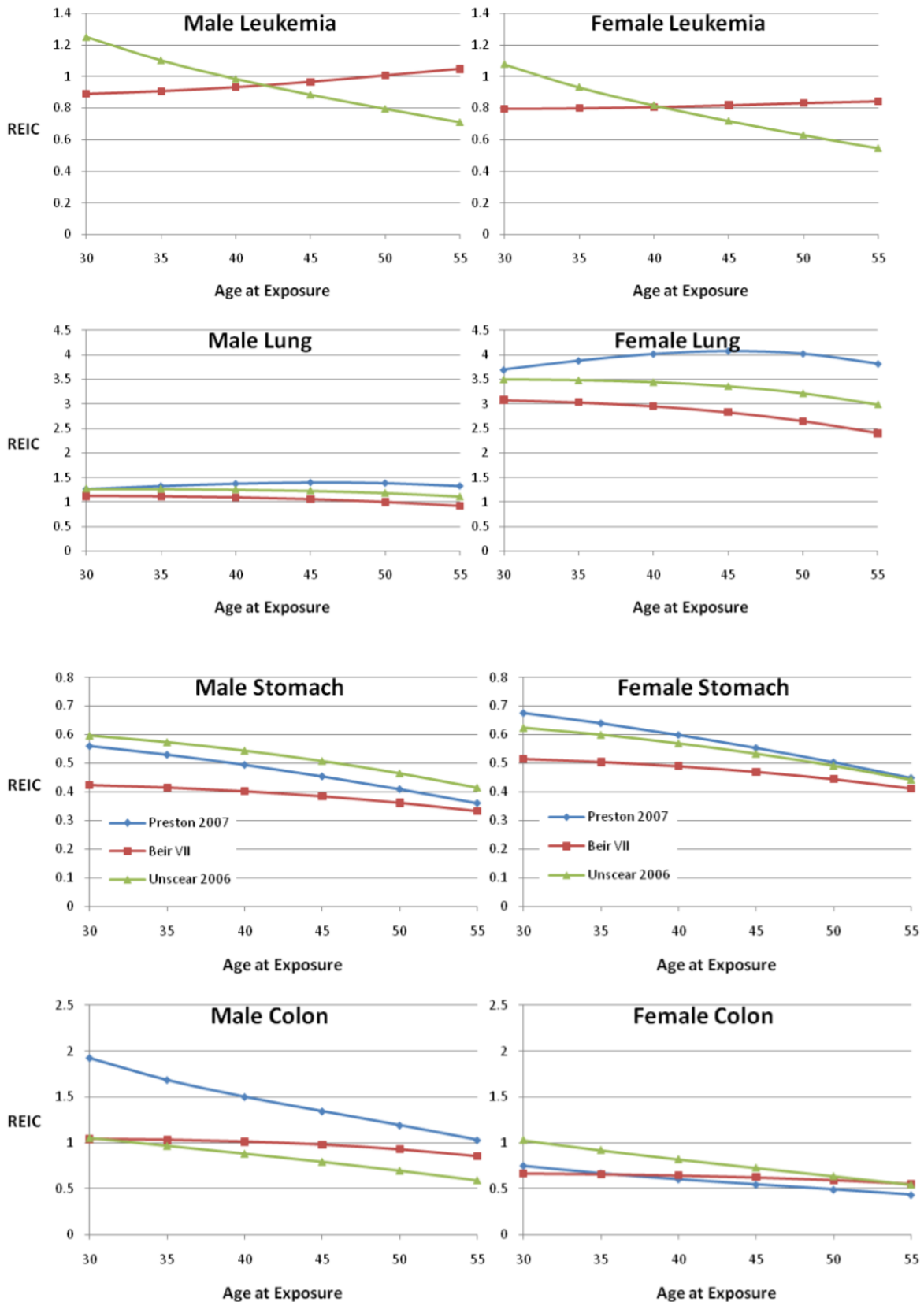
A su vez, el riesgo de padecer cáncer por exposición a la radiación viene dado por la tasa de incidencia cancerígena,  $\lambda_i$ .

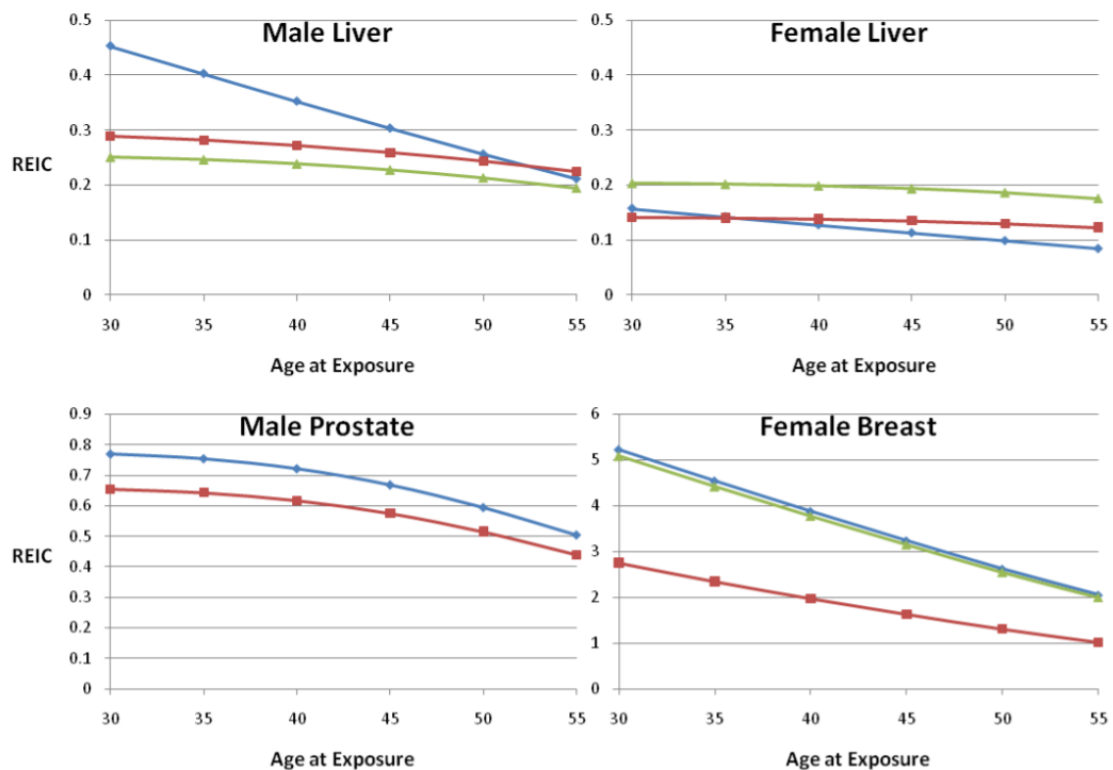
$$REIC(a_E, D) = \int_{a_E} dt \lambda_i(a, a_E, D) S_0(t) e^{-\int_{a_E}^t dz \lambda_M(z, a_E, D)} \quad (2.19)$$

Donde  $D$  es la dosis radioactiva,  $A_e$  el factor de edad y género en el momento de la exposición y a la edad alcanzada.

Las tasas de incidencia y mortalidad de cáncer vienen dadas por modelos de riesgos multiplicativos en los que se tiene en cuenta la edad, el género y el tejido u órgano correspondiente, a través del estudio de la enfermedad en la población. Existen diversos modelos como el BEIR VII, UNSCEAR o el Preston que estudian las probabilidades de las funciones REID y REIC teniendo en cuenta diferentes factores como la edad y el género y considerando una latencia (tiempo posterior a la exposición) mínima de 5 años para el cáncer y 2 años para la leucemia.







En la figura se puede observar la influencia de la edad y el género a la hora de determinar los límites de exposición radiactiva para prevenir la aparición de un cáncer en los distintos órganos del ser humano, así como la comparación entre los tres modelos.

Tras estudiar los diversos modelos, la NASA establece unos límites de exposición a la radiación basados en la edad y en el género. Estos límites han sido determinados considerando diferentes criterios para establecer unos límites razonables y aceptables que siguen seis principios:

- Los estándares que usa la NASA se aplican a una parte limitada de la población.
- Mantienen registros detallados de exposición de la tripulación.
- Realizan la evaluación de riesgo antes de la misión
- Mantienen procedimientos operativos para minimizar la posibilidad de exposición excesiva
- Persiguen el menor valor de exposición que sea posible (As Low as Reasonably Achievable: ALARA)
- La exposición a la radiación cumple con el 29 CFR 1910.96, excepto cuando la misión no pueda llevarse a cabo de otra manera.



La dosis media anual que recibe un ser humano es de 0,0036Sv, la cual es bastante baja. Sin embargo, los límites internacionales están puestos en 0,05 Sv al año para personas que trabajen en ambientes radioactivos. La NASA, a su vez, establece unos límites menos restrictivos para misiones espaciales de 0,50 Sv/año, siendo menor el valor en el caso de astronautas jóvenes. La exposición durante la carrera de un astronauta no excede un riesgo del 3% del riesgo a muerte inducida por exposición a la radiación (REID). En la siguiente tabla se pueden observar los límites establecidos en función de la edad y el género.

Career Exposure Limits for NASA Astronauts by Age and Gender*				
Age (years)	25	35	45	55
Male	1.50 Sv	2.50 Sv	3.25 Sv	4.00 Sv
Female	1.00 Sv	1.75 Sv	2.50 Sv	3.00 Sv

Tabla. 2.4.5. Límites de exposición en la carrera para astronautas de la NASA en función del género y edad. (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

Para misiones de 1 año de duración los límites establecidos son:

Age at Exposure, y	E (mSv) for a 3% REID (Ave. Life-loss per Death, y)	
	Males	Females
30	620 (15.7)	450 (15.7)
35	720 (15.4)	550 (15.3)
40	800 (15.0)	620 (14.7)
45	950 (14.2)	750 (14.0)
50	1150 (12.5)	920 (13.2)
55	1470 (11.5)	1120 (12.2)

Tabla. 2.4.6. Límites de exposición anuales para astronautas de la NASA en función del género y edad. (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

En la siguiente tabla se puede observar la diferencia entre los límites de exposición a la radiación entre astronautas y la población general, ya que un astronauta estará expuesto a aproximadamente 3 veces la máxima radiación anual recomendada para una persona que vive en la Tierra.

Depth of Radiation Penetration and Exposure Limits for Astronauts and the General Public (in Sv)				
	Exposure Interval	Blood Forming Organs (5 cm depth)	Eyes (0.3 cm depth)	Skin (0.01 cm depth)
Astronauts	30 Days	0.25	1.0	1.5
	Annual	0.50	2.0	3.0
	Career	1-4	4.0	6.0
General Public	Annual	0.001	0.015	0.05

Tabla. 2.4.7. Diferencia entre los límites de exposición para un astronauta y un ciudadano (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

También se han establecido límites de exposición a corto plazo para prevenir efectos nocivos para la salud que no necesariamente sean el desarrollo de cáncer. Los límites para los órganos que forman la sangre (BFO) previenen frente al riesgo de sufrir efectos como náuseas<sup>22</sup>, vómitos o fatiga. En el caso de los límites de radiación para la piel, las enfermedades de corazón o del sistema nervioso central (CNS) previenen contra el riesgo de sufrir enfermedades degenerativas que podrían aparecer posteriormente la misión espacial. Estos límites se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Organ	30-day Limit	1 Year Limit	Career Limit
Lens*	1000 mGy-Eq	2000 mGy-Eq	4000 mGy-Eq
Skin	1500	3000	6000
BFO	250	500	Not applicable
Heart **	250	500	1000
CNS ***	500	1000	1500
CNS *** (Z≥10)	-	100 mGy	250 mGy

Tabla. 2.4.8. Límites de exposición para los principales órganos (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

Los límites establecidos por otras agencias espaciales, como la europea (ESA) o la rusa (RSA) están basados principalmente en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), enfocadas en la radiación terrestre y ligeramente modificadas. Estos límites no están calculados en base a diferencias de género o edad.

Limit	Value	Comment
Career	1 Sv (1000 mSv)	ICRP- no age or gender dependence
Blood Forming Organs (BFO)	0.25 Sv for 30 d; 0.5 Sv for Annually	ISS Consensus limits
Eye	0.5 Sv for 30 d; 1.0 Sv Annually	
Skin	1.5 Sv for 30 d 3.0 Sv for Annually	

Tabla. 2.4.9. Límites de exposición a la radiación de la ESA (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

Limit	Value	Comment
Career	1 Sv (1000 mSv)	ICRP- no age or gender dependence
Blood Forming Organs (BFO)	0.15 Sv for Acute (1-time) 0.25 Sv for 30 d; 0.5 Sv for Annually	
Eye	0.5 Sv for 30 d; 1.0 Sv Annually 2.0 Sv for Career	
Skin	1.5 Sv for 30 d 3.0 Sv for Annually 6.0 Sv for Career	

Tabla. 2.4.10. Límites de exposición a la radiación de la RSA (Fuente: NASA. "Radiation risk acceptability and limitations". Francis A. Cucinotta, Ph.D.)

## 2.5. NIVELES DE RADIACIÓN EN MARTE

La misión de colonizar Marte presenta varios riesgos, entre los que se encuentran los niveles de radiación que llegan al planeta. Esto se debe principalmente a que el planeta carece de una magnetosfera que lo proteja, unido al bajo espesor de su atmósfera, que no impide que lleguen partículas radioactivas a la superficie del planeta.

A diferencia de la Tierra, protegida en gran medida de la radiación, Marte cuenta con niveles de radiación mucho más altos a los que está sometido el ser humano en el planeta terrestre.

Las dos fuentes principales de radiación en el planeta Rojo son los rayos cósmicos (GCR) y las partículas provenientes de eventos solares (EPS). Estas partículas interactúan con la atmósfera y acaban penetrando hasta la superficie, donde producen partículas secundarias como neutrones y rayos gamma, que contribuyen a formar un ambiente radioactivo.

A la hora de enviar al ser humano a Marte, es necesario y prioritario determinar las dosis a las que estarán sometidos los astronautas en el planeta.

En 2001, como parte de la misión del Mars Odyssey, se mandó un espectrómetro con la intención de medir la radiación en Marte. Este se conocía como el Experimento de radiación ambiental de Marte (MARIE). La tarea principal de MARIE era determinar el espectro de radiación cósmica galácticos durante el ciclo solar de 24h y estudiar la dinámica de los eventos solares.

A raíz de este experimento se logró saber que los niveles de radiación en la órbita de Marte son dos veces y medio superiores a los que se alcanzan en la Estación Espacial Internacional, un valor medio de entre 400 y 500 mSv/a. Aunque debido a la fina atmósfera del planeta, aun así, los niveles serían cercanos a los de la ISS en la superficie marciana. Los resultados también mostraron la diferencia en los niveles dependiendo de la altitud, recogiendo valores medios de 0,015-0,02 Sv al año, pero llegando a valores menores a 0,01 Sv al año. Sin embargo, durante los eventos de partículas solares se alcanzaban dosis 100 veces mayores, como se puede apreciar en el diagrama que se muestra a continuación.

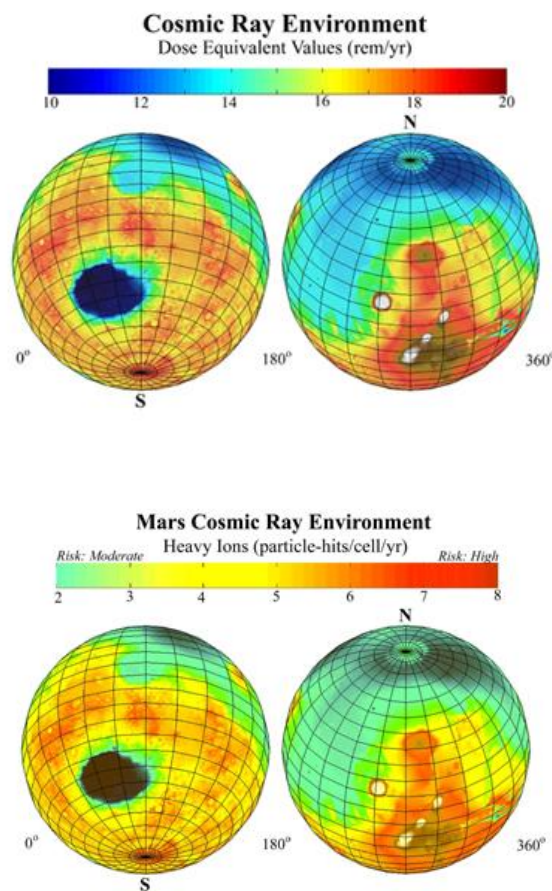


Fig 2.5.1. Valores de radiación cósmica en la superficie de Marte (Fuente: Mars Exploration Program Analysis Group via <https://mepag.jpl.nasa.gov/>)

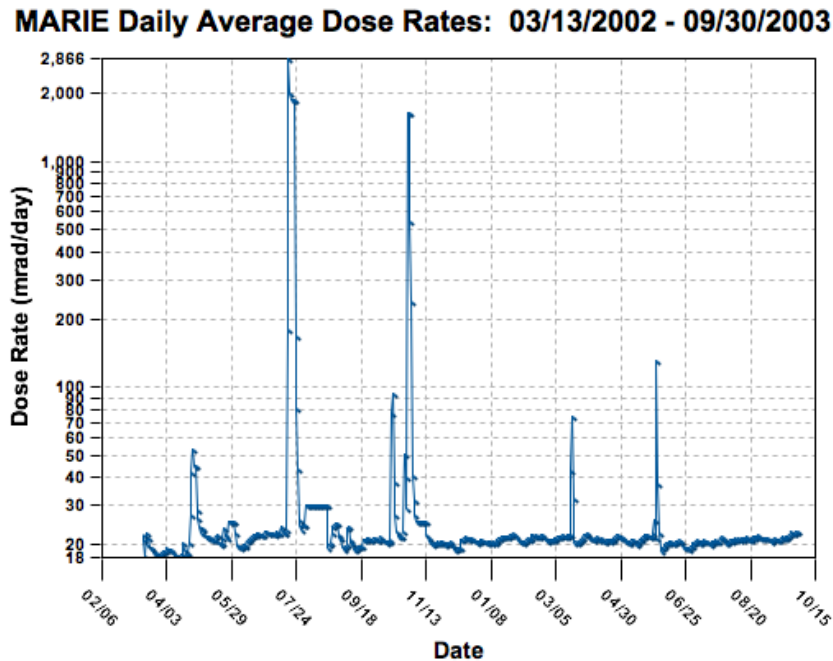


Fig 2.5.2. Dosis media de exposición a la radiación captada por el experimento Marie desde marzo de 2002 hasta septiembre de 2003 (Fuente: NASA)

En 2012 otro experimento llamado RAD fue enviado a la superficie de Marte en el rover Curiosity. Su tarea era caracterizar el espectro radiactivo desde el interior de la nave, así como detectar y analizar las partículas radiactivas más dañinas en la superficie del planeta.

El RAD midió dosis con dos detectores diferentes, uno de silicona (BI) y otro con un centellador de plástico € con una composición similar a la del tejido corporal, más sensible ante neutrones. Ambos detectores recogieron datos desde diciembre de 2011 hasta julio del 2012 durante el viaje hasta Marte.

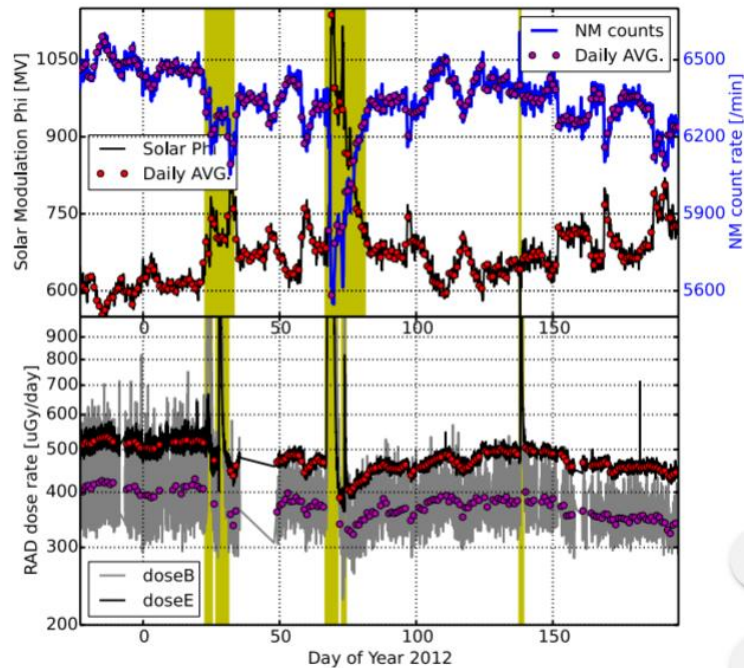


Fig 2.5.3. Monitorización de los valores captados por el RAD (Fuente: Variations of dose rate observed by MSL/RAD in transit to Mars. A&A)

En la parte superior se puede observar la tasa de conteo del monitor de neutrones durante el viaje a Marte (línea azul) y los valores promedios diarios. También se observa el potencial de modulación solar y su media diaria. En amarillo aparecen sombreados los dos eventos de partículas solares que detectó el RAD.

Durante su funcionamiento en la órbita y superficie del planeta, desde agosto de 2012 a junio de 2013, el RAD ha estado monitorizando continuamente las partículas de los rayos cósmicos y ha detectado hasta 5 eventos de partículas solares. Los resultados publicados en mayo de 2013 mostraron valores de exposición de  $662 \pm 108$  mSv al año, un 95% provenientes de GCRs. También se han podido calcular valores para misiones de unos 180 días, en los que se alcanzarían dosis de 300 Ms.

### **CAPÍTULO 3**

#### **MÉTODO: ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN EN MARTE MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE OLTARIS**



## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN EN MARTE MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE OLTARIS

### 3.1. OLTARIS

OLTARIS (On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space) es una herramienta online que analiza los efectos que tiene la radiación espacial tanto en humanos como en equipos electrónicos, naves o rovers, entre otros.

Esta herramienta está formada principalmente por dos partes principales, la web desde la que el usuario interactúa y elige los parámetros del ensayo; y el entorno donde se ejecutan las operaciones y los cálculos necesarios para completar el ensayo.

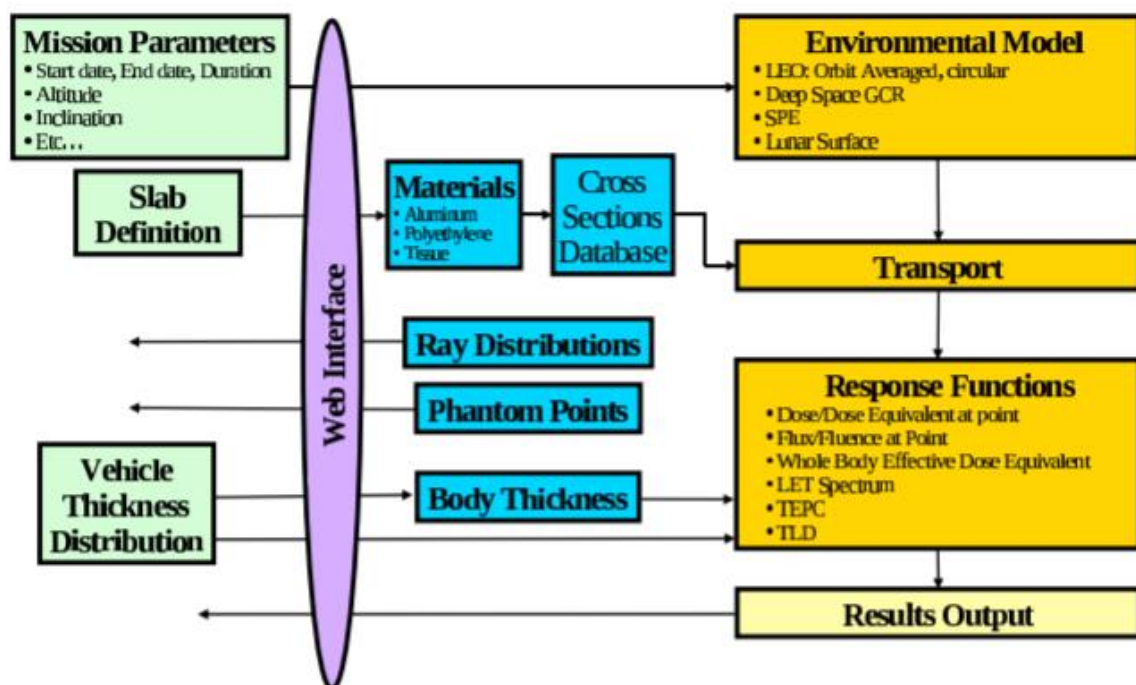


Fig 3.1.1. Flujo de trabajo de OLTARIS (Fuente: OLTARIS)

En la imagen superior se puede observar el flujo de trabajo que define la aplicación. Las cajas verdes indican aquellos parámetros que el usuario tiene que definir acerca de la geometría y materiales del vehículo y las condiciones del entorno radiactivo en el que se realizará el ensayo. Las cajas azules muestran aquellos datos que o bien pueden ser suministrados por el usuario, o que pueden ser calculados por la aplicación. Finalmente, las cajas amarillas representan el resultado de la operación de cálculo del módulo de ejecución.



El módulo del entorno define el ambiente radiactivo en el que será desarrollado el ensayo. Este permite elegir entre distintos tipos de entornos, desde un evento de partículas solares histórico (ESP), una combinación de dichos eventos o la radiación de partículas de rayos cósmicos (GCRs); ambos en la superficie de la Luna, en la superficie de Marte o bien en espacio abierto. Este también permite hacer un estudio con las condiciones que se producen en la órbita terrestre (EO). El resultado de estos entornos es un espectro del flujo.

El módulo de transporte depende del tipo de geometría utilizada, en placa o distribución de espesores. El modelo de transporte está basado en HZETRN2005 para ambos tipos. Si se utiliza una geometría de placa, el modelo de transporte se basa en el transporte de las partículas desde las condiciones de contorno establecidas y su paso por los materiales y espesores definidos por el usuario, teniendo como resultado flujo en las interfaces del material y al final del contorno. En el caso de una distribución de espesores se da un conjunto de cálculos para el transporte en una variedad de profundidades de cada material.

Finalmente, el módulo de respuesta es el que proporciona el resultado del flujo calculado con el módulo de transporte.

### **3.1.1. CONDICIONES DE CONTORNO**

El entorno radioactivo en torno al que se realiza el estudio en OLTARIS dependerá del tipo de radiación que se seleccione. Las condiciones de contorno iniciales pueden ser Rayos cósmicos (GCR), Eventos de partículas solares (ESP), protones atrapados en el campo magnético de la Tierra o neutrones de la atmósfera terrestre. A raíz de estas condiciones se desarrolla un espectro energético de cada partícula o de una combinación de ellas.

A continuación, se describen las fórmulas y modelos utilizados por OLTARIS para hacer los pertinentes cálculos según el entorno radiactivo.

#### **3.1.1.1. EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES (ESP)**

OLTARIS utiliza un histórico de los EPS más importantes que se han producido y sus fórmulas correspondientes. Las unidades usadas para todos los espectros son

$$\frac{\text{protones}}{\text{cm}^2\text{-AMeV-evento}}.$$

- Webber, febrero 1956, 100MV de rigidez:

$$\phi(E) = 1.0 \times 10^7 \left[ \frac{E+m}{\sqrt{E(E+2m)}} \right] \exp \left[ \frac{239.1 - \sqrt{E(E+2m)}}{100} \right] \quad (3.1)$$

- LaRC, febrero 1956:

$$\phi(E) = 6.0 \times 10^7 \left( \frac{10-E}{25} \right) + 9.735 \times 10^5 \exp \left( \frac{100-E}{320} \right) \quad (3.2)$$

- Noviembre 1960:

$$\phi(E) = 6.33 \times 10^8 \left( \frac{10-E}{12} \right) + 4.88 \times 10^6 \exp \left( \frac{100-E}{80} \right) \quad (3.3)$$

- King, agosto 1972:

$$\phi(E) = 2.98 \times 10^8 \exp \left( \frac{30-E}{26.5} \right) \quad (3.4)$$

- LaRC, agosto 1972:

$$\phi(E) = 22 \times 10^7 \exp \left( \frac{100-E}{30} \right) \quad (3.5)$$

- Agosto 1989:

$$\phi(E) = \frac{8.652 \times 10^{10}}{59.261} \frac{E+m}{\sqrt{E(E+2m)}} \exp \left[ \frac{-\sqrt{E(E+2m)}}{59.261} \right] \quad (3.6)$$

- Septiembre 1989:

$$\phi(E \leq 10 \text{ MeV}) = 1.446 \times 10^8 \frac{E+m}{\sqrt{E(E+2m)}} \exp \left[ \frac{-\sqrt{E(E+2m)}}{102.118} \right] \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \phi(10 \text{ MeV} < E < 30 \text{ MeV}) \\ = [-0.0015E^2 + 0.07184E + 0.4304] \phi(E \leq 10 \text{ MeV}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\phi(E \geq 30 \text{ MeV}) = \frac{2.034 \times 10^7}{\sqrt{1 - \left(\frac{m}{E+m}\right)^2}} \left[ \sqrt{\frac{E(E+2m)}{30(30+2m)}} \right]^{-4.5} \quad (3.9)$$

- Octubre 1989:

$$\phi(E) = 6.104 \times 10^8 \left[ \frac{E+m}{\sqrt{E(E+2m)}} \right] \exp \left[ \frac{-\sqrt{E(E+2m)}}{92.469} \right] \quad (3.10)$$

- Carrington 1859, ajustado 1989:

$$\phi(E) = 0.877 \times 0.3841 E^{0.3841-1} \times 4.79 \times 10^{11} \exp(-0.877 E^{0.3841}) \quad (3.11)$$

- Carrington 1959, ajustado 1991:

$$\phi(E) = 0.972 \times 0.441 E^{0.441-1} \times 1.47 \times 10^{12} \exp(-0.9727 E^{0.441}) \quad (3.12)$$

A continuación, se puede observar la diferencia existente entre los varios eventos:

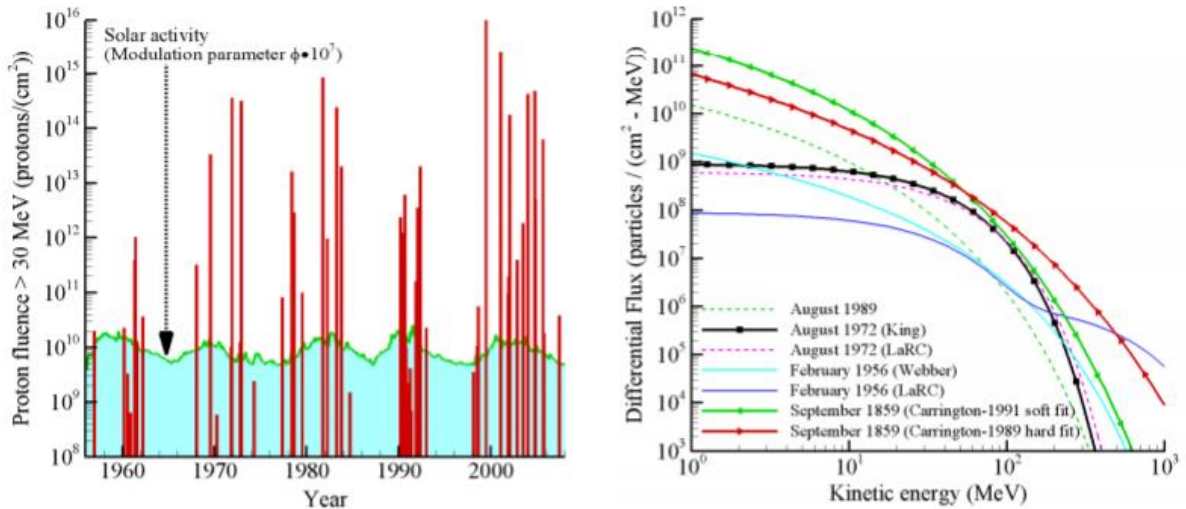


Fig 3.1.2. Comparación de los distintos eventos solares que permite seleccionar OLTARIS

### 3.1.1.2. RADIACIÓN CÓSMICA

El espectro de radiación cósmica utilizado en OLTARIS viene definido por el modelo desarrollado por O'Neill basado en la adaptación de los espectros medidos por satélites y globos entre 1954 y 1992, y las mediciones posteriores, entre 1997 y 2002, tomadas por el satélite Advanced Composition Explorer.

Mediante la ecuación estacionaria de Fokker-Planch se han ajustado estos espectros, resolviendo el problema de la difusión, convección y pérdida de energía y tiene como resultado una estimación de un coeficiente de difusión adecuado.

Con este modelo es posible obtener un único valor del parámetro de desaceleración que describe la modulación del ciclo solar y determina el espectro energético de la radiación cósmica para elementos desde el hidrógeno hasta el níquel, a cualquier distancia del Sol.

El usuario de OLTARIS puede elegir tres métodos de entrada para establecer el periodo del ensayo.

- Selección de fecha de comienzo y fin de la misión, seleccionando día, mes y año. OLTARIS permite elegir como día de entrada desde el 1 de enero de 1951, en cuanto a la fecha más reciente que permite seleccionar se va actualizando, actualmente, el usuario podría elegir como fecha final el 31 de diciembre de 2017.
- Fecha de comienzo de la misión y duración en días de esta.
- Escenarios preestablecidos por el software y días de duración de la misión. En cuanto a los escenarios que ofrece OLTARIS, existen actualmente 11 escenarios con sus coeficientes de deceleración correspondiente.

Scenario	Deceleration Parameter
1956 Solar Min	401
1959 Solar Max	1986
1965 Solar Min	510
1970 Solar Max	1293
1977 Solar Min (DSNE <sup>3</sup> )	474
1982 Solar Max	1924
1987 Solar Min	467
1991 Solar Max	2525
1997 Solar Min	467
2000 Solar Max	1674
2007 Solar Min (predicted)	490

Tabla. 3.1.1. Parámetros de deceleración de los mínimos y máximos solares registrados en OLTARIS (Fuente: OLTARIS)

### 3.1.1.3.OTRAS CONDICIONES DE CONTORNO

OLTARIS permite el análisis en otras condiciones como la órbita terrestre o la superficie lunar.

Al realizar el análisis en la órbita de la Tierra entran en juego tres factores: la radiación cósmica, los protones atrapados por el campo magnético y los neutrones de albedo.

En cuanto a la superficie lunar, puede realizarse un estudio teniendo en cuenta tanto la radiación cósmica como los eventos de partículas solares (ESP).

### 3.1.2. TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

El algoritmo de transporte de OLTARIS es el HZETRN2005, desarrollado por Wilson y Cucinotta, y posteriormente mejorado por Slaba. Este último desarrollo un algoritmo de transporte de neutrones bidireccional utilizado en cálculos para geometría de placas.

En general, este algoritmo de transporte proporciona una solución numérica aproximada de la ecuación linealizada del transporte de Boltzmann.

En el caso de partículas ligeras ( $A < 4$  y  $Z < 2$ ) se resuelve la siguiente ecuación:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{A_j} \frac{\partial}{\partial E} S_j(E) + \sigma_j(E) \right] \phi_j(x, E) = \sum_k \int_E^\infty dE' \sigma_{k \rightarrow j}(E' \rightarrow E) \phi_k(x, E') \quad (3.13)$$

$$\phi_j(0, E) = f_j(E)$$

Donde  $\phi_j(x, E)$  es el flujo de las partículas de tipo  $j$  a una profundidad  $x$  con una energía cinética  $E$ .  $A_j$  es el número de masa atómica de la partícula y  $S_j(E)$  la potencia de frenado.

En cuanto a partículas pesadas, la ecuación puede simplificarse al considerar que los fragmentos de proyectiles rápidos tienen velocidad y energía por unidad de masa muy similar a la del proyectil, mientras que las partículas de excitación de estos fragmentos tienen muy baja energía.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{A_j} \frac{\partial}{\partial E} S_j(E) + \sigma_j(E) \right] \phi_j(x, E) = \sum_{k \rightarrow j} \sigma_{k \rightarrow j}(E) \phi_k(x, E) \quad (3.14)$$

Los isótopos utilizados en OLTARIS para calcular el transporte de partículas son 59 y están reflejados en la siguiente tabla.

Isotope	A	Z	Isotope	A	Z	Isotope	A	Z
Neutron	1	0	<sup>1</sup> H	1	1	<sup>2</sup> H	2	1
<sup>3</sup> H	3	1	<sup>3</sup> He	3	2	<sup>4</sup> He	4	2
<sup>6</sup> Li	6	3	<sup>7</sup> Li	7	3	<sup>8</sup> Be	8	4
<sup>9</sup> Be	9	4	<sup>10</sup> B	10	5	<sup>11</sup> B	11	5
<sup>12</sup> C	12	6	<sup>13</sup> C	13	6	<sup>14</sup> N	14	7
<sup>15</sup> N	15	7	<sup>16</sup> O	16	8	<sup>17</sup> O	17	8
<sup>18</sup> F	18	9	<sup>19</sup> F	19	9	<sup>20</sup> Ne	20	10
<sup>21</sup> Ne	21	10	<sup>22</sup> Ne	22	10	<sup>23</sup> Na	23	11
<sup>24</sup> Mg	24	12	<sup>25</sup> Mg	25	12	<sup>26</sup> Mg	26	12
<sup>27</sup> Al	27	13	<sup>28</sup> Si	28	14	<sup>29</sup> P	29	15
<sup>30</sup> S	30	16	<sup>31</sup> S	31	16	<sup>32</sup> S	32	16
<sup>33</sup> Cl	33	17	<sup>34</sup> Ar	34	18	<sup>35</sup> Cl	35	17
<sup>36</sup> Ar	36	18	<sup>37</sup> K	37	19	<sup>38</sup> Ar	38	18
<sup>39</sup> K	39	19	<sup>40</sup> Ca	40	20	<sup>41</sup> Ca	41	20
<sup>42</sup> Ca	42	20	<sup>43</sup> Sc	43	21	<sup>44</sup> Ti	44	22
<sup>45</sup> Ti	45	22	<sup>46</sup> Ti	46	22	<sup>47</sup> Ti	47	22
<sup>48</sup> V	48	23	<sup>49</sup> V	49	23	<sup>50</sup> Cr	50	24
<sup>51</sup> Cr	51	24	<sup>52</sup> Cr	52	24	<sup>53</sup> Mn	53	25
<sup>54</sup> Mn	54	25	<sup>55</sup> Fe	55	26	<sup>56</sup> Fe	56	26
<sup>57</sup> Co	57	27	<sup>58</sup> Ni	58	28			

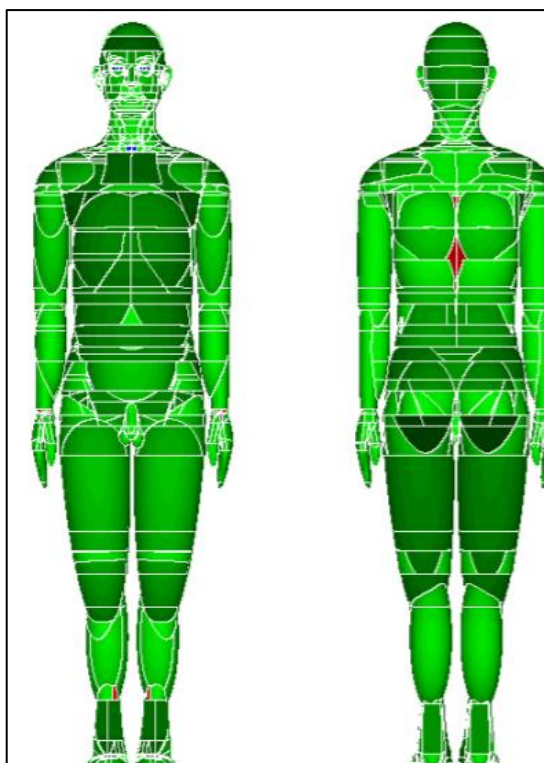
Tabla. 3.1.2. Isotopos del modelo de transporte de OLTARIS (Fuente: OLTARIS)

### 3.1.3. FUNCIONES DE RESPUESTA

OLTARIS calcula mediante la ecuación de Boltzmann en primer lugar el espectro del flujo en función de las partículas y energía. A raíz de este cálculo, el resultado se modifica en función de lo que requiera el usuario, para determinar la dosis absorbida (D), la dosis equivalente (H), la respuesta del detector de termoluminiscencia (TLD), la transferencia de energía lineal (LET), la respuesta del contador proporcional del tejido equivalente (TPEC) o la dosis equivalente efectiva (ED).

### 3.2. PHANTOM HUMANO

A la hora de llevar a cabo el análisis, cuando el usuario selecciona como función respuesta la dosis efectiva equivalente, automáticamente tiene que seleccionar un tipo de phantom humano. Actualmente el software tiene disponibles cuatro phantoms: CAM, CAF, MAX y FAX.



*Fig 3.2.1. Phantom humanos usados en OLTARIS (Fuente: OLTARIS)*

Los dos primeros tipos: CAM (Computerized Anatomical Male) and CAF (Computerized Anatomical Female) fueron creados en 1973 por Billing y Yucker para representar el 50% del cuerpo de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Estos están creados a partir de superficies cuadriculadas que intersectan entre ellas para formar tres sólidos en tres dimensiones, que representan el tejido y los órganos del ser humano.

A medida que los análisis en entornos radiactivos mediante distintos softwares han ido evolucionando, se han creado nuevos modelos de ser humano que se acercan aún más a la realidad. Es así como fueron creados MAX y FAX en 2003 por el equipo CalDose en Brasil. Estos últimos pueden calcular la dosis equivalente de hasta 27 órganos y la dosis equivalente efectiva del cuerpo mediante valores de la ICRP60.

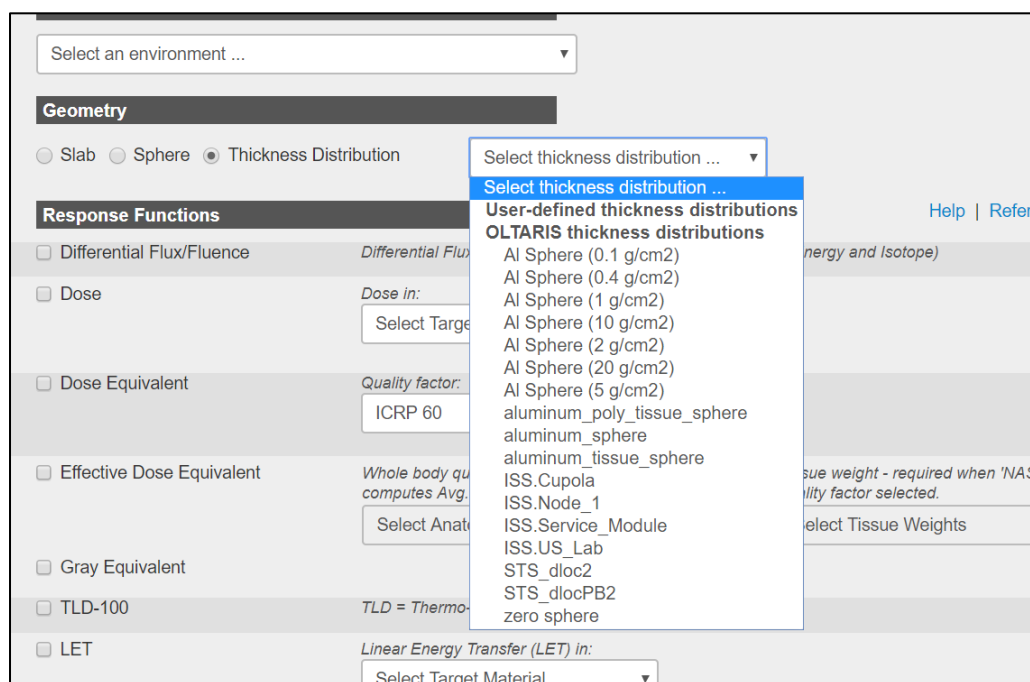
Las diferencias entre ambos tipos de modelo son anatómicas, relacionadas con la masa y la ubicación de distintos órganos.

### **3.3. ANÁLISIS CON OLTARIS**

Mediante el uso del software OLTARIS se pretende hacer un primer estudio del efecto de la radiación en el ser humano, en función de distintos parámetros (altitud, densidad superficial del material protector, tipo de fuente radioactiva). Se realizarán así ensayos modificando cuatro variables posibles:

- Geometría y materiales: Para realizar el análisis se recurre a una de las geometrías más sencillas que utiliza OLTARIS, una esfera que rodea el phantom humano simulando un traje espacial o incluso una nave. De esta forma, el material del espesor que se determine rodea el cuerpo humano y se coloca entre medias de este y el rayo, protegiéndolo así de la radiación.

Se utilizará para simular los distintos escenarios una esfera de aluminio en la que se variará la densidad superficial entre  $0,4 \text{ g/cm}^2$  y  $20 \text{ g/cm}^2$ , simulando aproximadamente el espesor de trajes y naves espaciales, para conocer a grandes rasgos el grado de protección necesario frente a las distintas fuentes de radiación.



*Fig 3.3.1. Selección de geometría en OLTARIS*

- Fuente de radiación: Se realizarán simulaciones con dos tipos de fuentes radioactivas, la radiación de los rayos cósmicos que afecta a largo plazo al ser humano y equipos electrónicos, y aquella que proviene de eventos de partículas solares, con altos niveles de radiación que son un peligro para la vida humana. En cuanto a la radiación cósmica se ha seleccionado como escenario el máximo solar de 1991, con un valor del parámetro de desaceleración de 1924, tal y como muestra la tabla 3.1.1.



GCR, Mars Surface

**Environment Definition: GCR, Mars Surface** [Help](#) | [Reference](#)

Mars surface analyses are performed on thickness distributions only. A surface-local-vertical vector is required and is used (along with the surface parameters defined below) to compute the appropriate amount of mars atmosphere to add along each ray in the hemisphere indicated by the surface-local-vertical. The vector can be defined either in the thickness distribution or on the project page in the Geometry section. Rays pointing toward the surface are assumed to be in the opposite hemisphere of the surface-local-vertical or can be indicated in the thickness distribution with dummy thicknesses with a type\_id="-1" to each ray points toward regolith. 300 g/cm<sup>2</sup> of Mars regolith is added to all surface pointing rays. These jobs are always run with ray-by-ray transport, thus automatically account for the neutron albedo. They can also take a long time to run, especially if effective dose is selected.

GCR Model: Badhwar-O'Neill 2014 ☐ Select Specific Ion

Mission Definition: ☒ Select Historical Solar Min/Max ☐ Enter Date ☐ Enter Fitting Parameter

Historical Min/Max: Select historical min/max

Mission duration in days: Select historical min/max

Mars Surface Parameters: 1965 Solar Min  
1970 Solar Max  
1977 Solar Min (DSNE)  
1982 Solar Max  
1987 Solar Min  
1991 Solar Max  
1997 Solar Min  
2001 Solar Max  
2010 Solar Min

Climate Database (MCD) Atmosphere  
 km (range: -10 to 30)

Fig 3.3.2. Selección de entorno de radiación GCR en OLTARIS.

Para analizar el impacto de los eventos de partículas solares se ha seleccionado el mayor EPS registrado hasta la fecha: Carrington 1859, ajuste septiembre 1989. De esta forma se simula el escenario más extremo.

SPE, Mars Surface

**Environment Definition: SPE, Mars Surface** [Help](#) | [Reference](#)

Mars surface analyses are performed on thickness distributions only. A surface-local-vertical vector is required and is used (along with the surface parameters defined below) to compute the appropriate amount of mars atmosphere to add along each ray in the hemisphere indicated by the surface-local-vertical. The vector can be defined either in the thickness distribution or on the project page in the Geometry section. Rays pointing toward the surface are assumed to be in the opposite hemisphere of the surface-local-vertical or can be indicated in the thickness distribution with dummy thicknesses with a type\_id="-1" to each ray that points toward regolith. 300 g/cm<sup>2</sup> of Mars regolith is added to all surface pointing rays. These jobs are always run with ray-by-ray transport, thus automatically account for the neutron albedo. They can also take a long time to run, especially if effective dose is selected.

☒ Historical SPE ☐ User Defined SPE

Use the check boxes to select one or more events, and numeric input fields to enter a multiplication factor. The multiplication factor multiplies the external flare fluence by the factor specified. If more than one event is selected, they are combined.

<input checked="" type="checkbox"/> September 1859 (Carrington - September 1989 hard fit)	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/> August 1972 (LaRC)	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="checkbox"/> September 1859 (Carrington - March 1991 soft fit)	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/> August 1972 (King)	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="checkbox"/> February 1956 (Webber)	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/> August 1989	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="checkbox"/> February 1956 (LaRC)	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/> September 1989	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="checkbox"/> November 1960	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/> October 1989	<input type="text" value="1.0"/>
<input type="checkbox"/> Sum of October 1989 Tylka Band fits	<input type="text" value="1.0"/>		

Fig 3.3.3. Selección de entorno de radiación EPS en OLTARIS

- **Altitud en Marte:** Todas las simulaciones se realizarán sobre la superficie del planeta Rojo, variando únicamente la altitud en este, entre los 25, 10 y -5km sobre la elevación cero o datum definido. De esta forma se analizará el efecto de la atmósfera del planeta en los niveles de exposición a la radiación que se alcanzan en los diversos puntos.

Dichas altitudes son seleccionadas en base a la gran diferencia que existe entre el punto más alto y más profundo de Marte. La altitud de 25km sobre el datum correspondería a la altitud que posee el Monte Olimpo en el planeta, situado aproximadamente a 22km de altitud y siendo el mayor volcán del Sistema Solar. Dicho volcán se encuentra en una región llamada Tharsis, cuya altitud oscila alrededor de los 10km. Por último, en el planeta existen regiones, como los cráteres de impacto Hellas Planitia y Argyre Planitia, que se encuentra entre 5 y 8 km bajo el datum; o el Valle Marineris, a 8 km de profundidad también.

November 1960 ☐ 1.0 ☐ October 1989

Sum of October 1989 Tylka Band fits ☐ 1.0

Mars Surface Parameters

☒ MarsGRAM Atmosphere ☐ Mars Climate Database (MCD) Atmosphere

Elevation  km (range: -10 to 30)

Save External Differential Flux for Free-Space Environment? ☐ Yes ☒ No

**Geometry**

Select thickness distribution ... ▼

*Fig 3.3.4. Selección de altitud sobre la superficie de Marte en OLTARIS*

- **Modelo humano (phantom):** se estudiará las diferencias existentes entre los dos tipos de modelos que proporciona OLTARIS, así como el efecto de la radiación en ambos géneros mediante el uso de los cuatro phantoms humanos, CAF, CAM, FAX y MAX.

Response Functions

Help | Refer

☐ Differential Flux/Fluence
 

Differential Flux/Fluence after Transport (Function of Depth, Energy and Isotope)

☐ Dose
 

Dose in:
 

Select Target Material

☐ Dose Equivalent
 

Quality factor:
 

ICRP 60

☒ Effective Dose Equivalent
 

Whole body quantity, uses anatomical model, also computes Avg. Dose and Dose Equivalent to organs.
 

Select Anatomical Model
 

Select Anatomical Model
 

Computerized Anatomical Female (CAF)
 Computerized Anatomical Male (CAM)
 Female Adult voXel 2005 (FAX)
 Male Adult voXel 2005 (MAX)

Tissue weight - required when 'NA' quality factor selected.
 

Select Tissue Weights

☐ Gray Equivalent

☐ TLD-100

☐ LET
 

Select Target Material

☐ Field of View Responses
 

Field of view (half angle, degrees):
 

0.0

 range: 1° to 180°

Create project

Cancel

Fig 3.3.5. Selección de phantom en OLTARIS

En resumen, se va a realizar simulaciones en 48 escenarios diferentes

	GCR 1991 Max						SPE Carrington					
	0,4 g/cm2			20 g/cm2			0,4 g/cm2			20 g/cm2		
	-5km	10km	25km	-5km	10km	25km	-5km	10km	25km	-5km	10km	25km
CAF												
CAM												
FAX												
MAX												

Tabla. 3.3.1. Escenarios simulados en OLTARIS

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. FLUJO DE LAS FUENTES DE RADIACIÓN EN MARTE

En primer lugar, se muestra el flujo de partículas de ambas fuentes de radiación en función de la energía en uno de los escenarios que se simulan en OLTARIS para analizar la composición de partículas de estas fuentes de energía y la variación del flujo en función de la energía de estas.

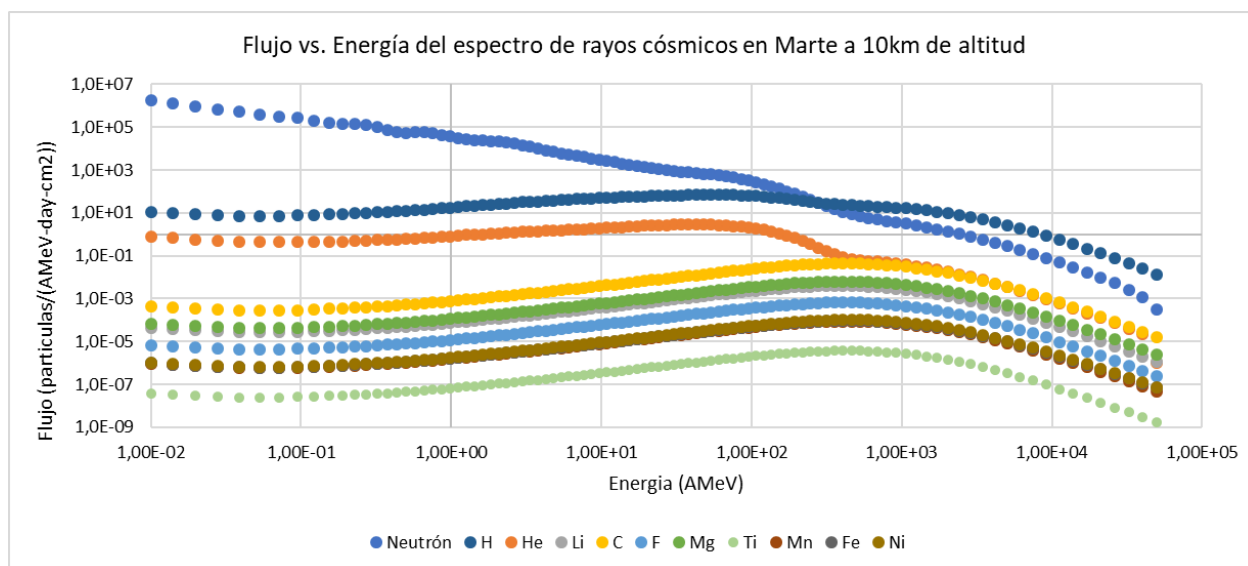


Fig 4.1.1. Flujo vs Energía de las partículas de radiación cósmica a 10km sobre la superficie de Marte

En el caso de la radiación cósmica, tal y como se puede apreciar en la figura, existe una predominancia de hidrógeno y helio en el flujo de rayos cósmicos, frente a un bajo porcentaje de elementos pesados en comparación a los primeros. Se observa como la mayor presencia de estos elementos y, por lo tanto, la composición del flujo es independiente de la energía hasta llegar a un rango de aproximadamente 10MeV. El alto flujo de neutrones viene dado por las interacciones que se producen entre las partículas de rayos cósmicos.

Las partículas con niveles más bajos de energía atraviesan la atmósfera de marte más frecuentemente, el flujo es mayor. Aunque el número de elementos altamente energéticos es mucho menor, al tener energías muy altas, son capaces de penetrar muchos centímetros de tejido u otros materiales. Como consecuencia, aunque la cantidad de partículas HZE es relativamente pequeña, estas partículas tienen un impacto biológico significativo.

En la gráfica también se puede apreciar un cambio en la tendencia con valores de energía a partir de los 100MeV, desde la cual el flujo de radiación cósmica decrece notablemente debido a la desaceleración de los elementos.

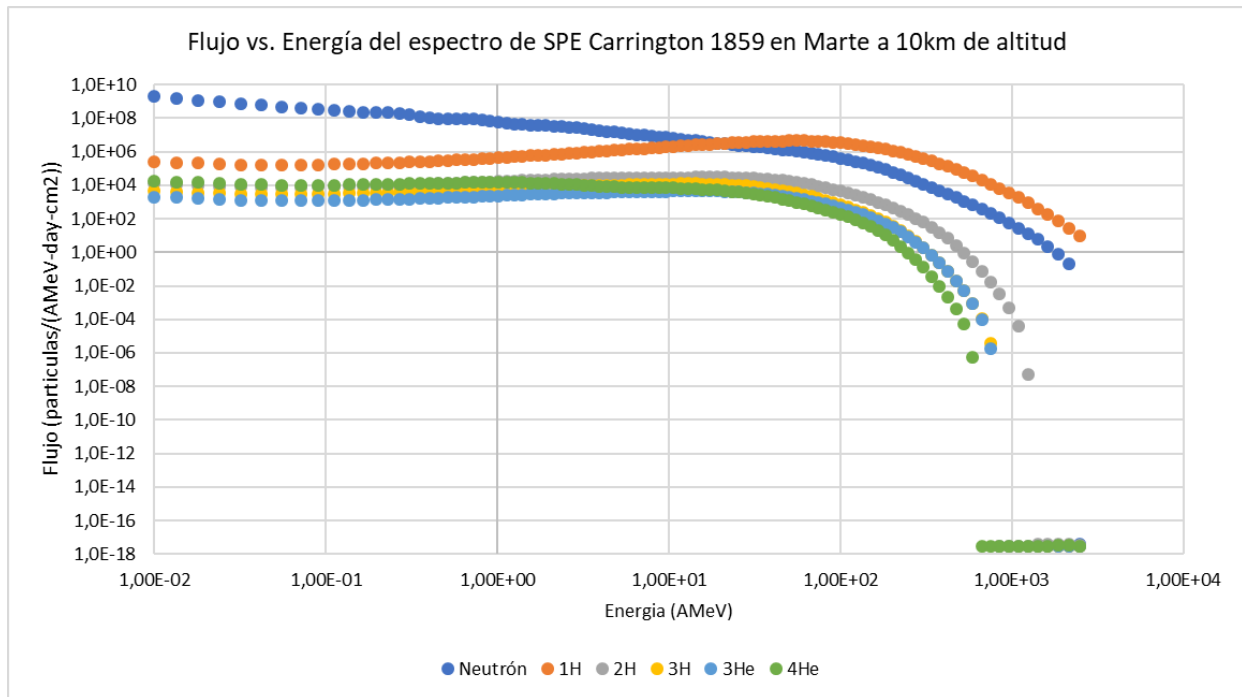


Fig 4.1.2. Flujo vs Energía de las partículas de EPS a 10km sobre la superficie de Marte

Por otro lado, se encuentran los eventos de partículas solares, producidos por grandes perturbaciones en el sol que producen grandes flujos de radiación, como se puede ver en la gráfica. A diferencia de la radiación cósmica, el flujo de las partículas provenientes de partículas solares alcanza niveles mucho mayores, además de constantes independientemente de la energía. El flujo se encuentra en torno a las  $10^6$  partículas/MeV·día·cm<sup>2</sup> y se mantiene constante hasta rangos de energía a partir de los 100 MeV. Los eventos terminan cuando la energía de las partículas que los forman decae y acaban desintegrándose, en el caso de eventos de gran magnitud como el Carrington en 1859, alcanzan energías máximas de 100-1000 MeV.

## 4.2. COMPARACIÓN ENTRE DOSIS DE EXPOSICIÓN DE LAS FUENTES DE RADIACIÓN EN MARTE

A continuación, se realiza un análisis de los efectos que tienen las dos principales fuentes de radiación existentes en Marte. Para ello se realizan 12 simulaciones con un modelo de ser humano perteneciente al género masculino (CAM). Se realiza la simulación en tres puntos diferentes de la superficie del planeta variando la altitud entre

-5, 10 y 25 km junto con la protección ( $0,4 \text{ g/cm}^2$  y  $20 \text{ g/cm}^2$ ) y los dos tipos de fuente radiactiva, utilizando como condiciones de contorno el mayor evento EPS registrado y el valor del máximo solar de 1991 de radiación cósmica. Los resultados obtenidos son los siguientes:

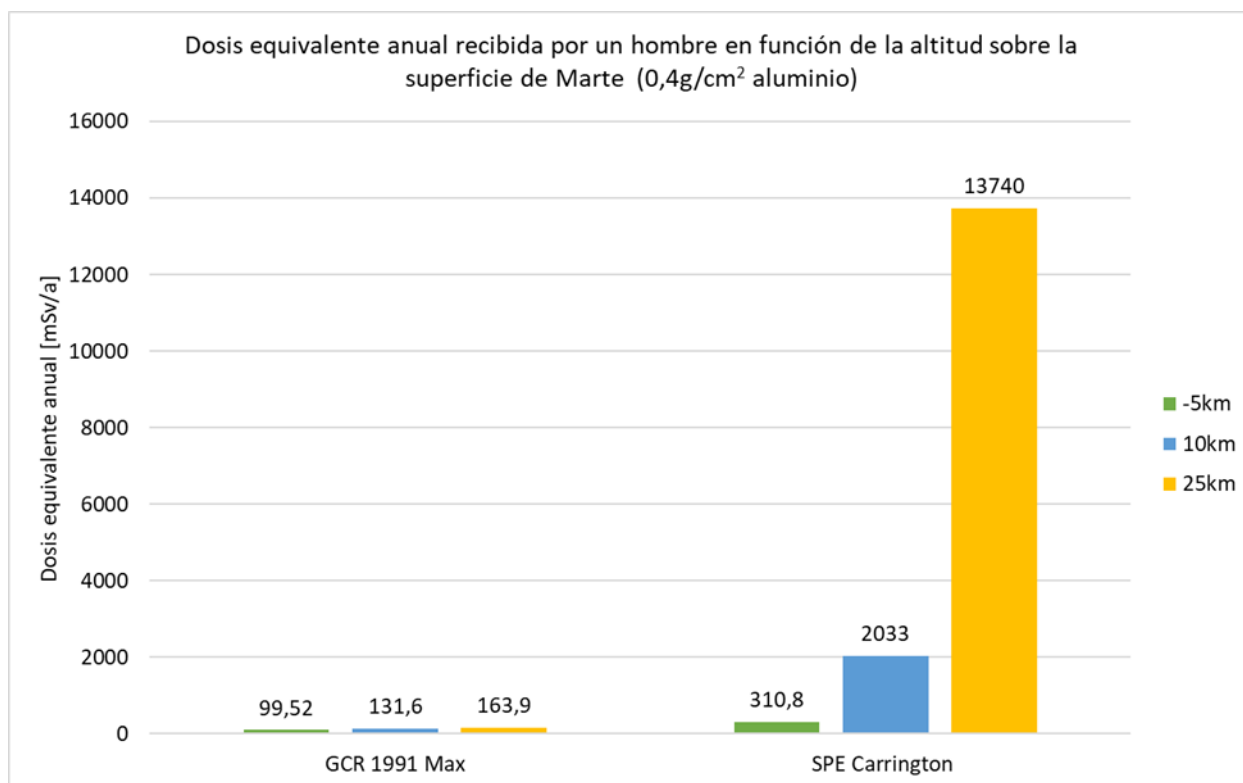


Fig 4.2.1. Dosis equivalente anual recibida por un hombre (CAM) en función de la altitud sobre la superficie de Marte con una protección de  $0,4 \text{ g/cm}^2$  de aluminio

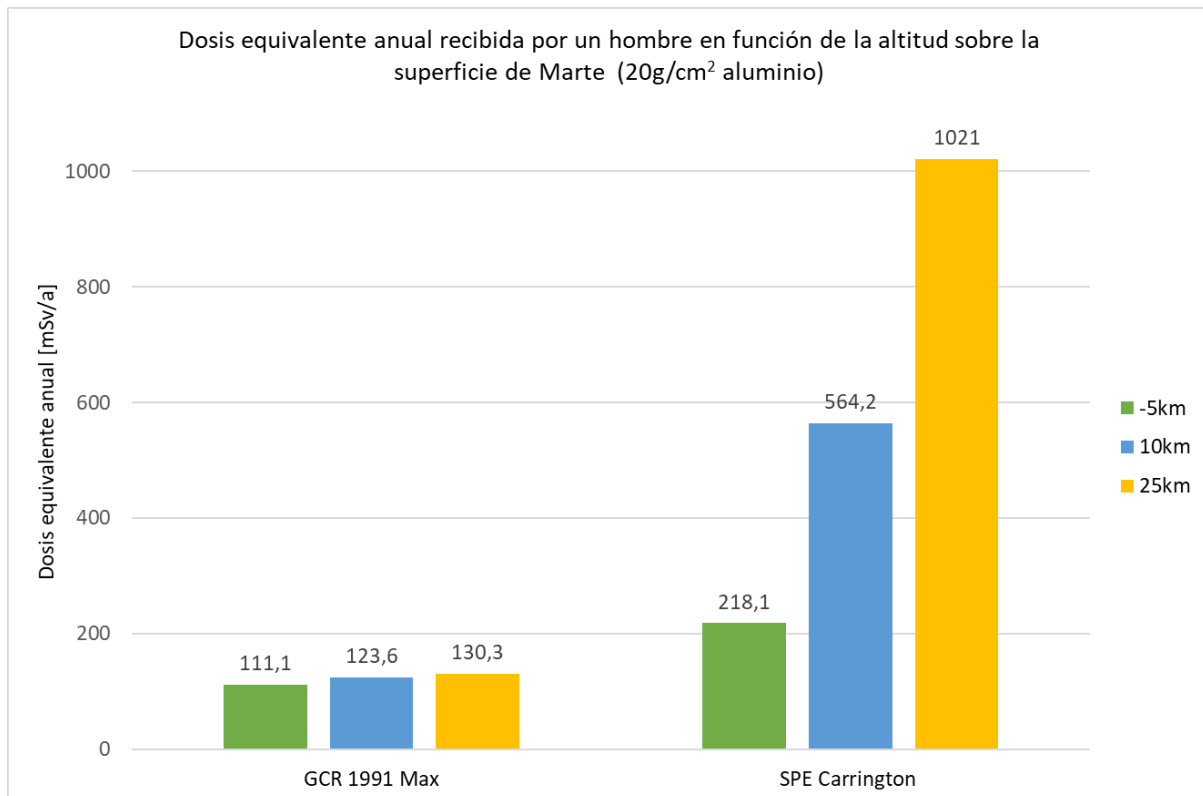


Fig 4.2.2. Dosis equivalente anual recibida por un hombre (CAM) en función de la altitud sobre la superficie de Marte con una protección de 20 g/cm<sup>2</sup> de aluminio

Como se puede apreciar en ambos gráficos, las dosis de radiación alcanzadas por exposición a un evento de partículas solares son mucho mayores que aquellas que se alcanzan al estar expuestos a la radiación cósmica. Es por ello por lo que se considera que los eventos de partículas solares son mucho más nocivos a corto plazo, suponiendo un grave riesgo para el ser humano en sus misiones al espacio.

A medida que incrementamos la altitud donde se encuentra el asentamiento en Marte, los niveles de radiación a los que está expuesto el ser humano son mayores. Esto se debe a que la atmósfera de Marte ofrece protección frente a la radiación, por lo tanto, cuánto más porcentaje de atmósfera exista sobre el asentamiento, mayor protección atmosférica poseerá.

También se puede observar que a medida que variamos la altitud sobre la superficie, los niveles de exposición a la radiación aumentan en ambos casos (radiación cósmica y eventos de partículas solares), pero se incrementan más rápidamente en el caso de estos últimos. Es decir, los niveles de exposición frente a los eventos de partículas solares son mucho más sensibles a la protección que exista entre el entorno y el astronauta. Si se analiza un caso en particular, con un asentamiento a 25km sobre la superficie, y



analizamos ambas fuentes de radiación con una protección de  $0,4 \text{ g/cm}^2$  y  $20 \text{ g/cm}^2$  se puede observar como en el caso de la radiación cósmica, existe una diferencia de unos 30 mSv/a, mientras que en el caso de los eventos de partículas solares la diferencia es de 12000 mSv. Esto se debe a la naturaleza altamente energética de las partículas de radiación cósmica.

En resumen, se puede apreciar que las dosis de radiación cósmica oscilan alrededor de  $0,1 \text{ Sv/año}$ , no suponen un riesgo inmediato para la salud, pero sí que pueden ser fuente importante de enfermedades relacionadas con la radiación a largo plazo. En contrapunto se encuentra la radiación que poseen las partículas de eventos solares, que producen dosis de exposición de entre 1-2 Sv, llegando en algunos casos más extremos a los 10 Sv. Esto supone que un solo evento de estas características puede dar lugar a altas dosis de radiación en un tiempo muy reducido, llegando a provocar una enfermedad crítica inmediata.

### 4.3. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN CÓSMICA EN MARTE

Una vez comparadas ambas fuentes radioactivas, se procede a analizar el impacto que tiene la radiación cósmica en una estancia de un año en el planeta Rojo. Para ello se realizará una simulación con dos tipos de modelo humano y los dos géneros correspondientes (CAF/CAM y FAX/MAX).

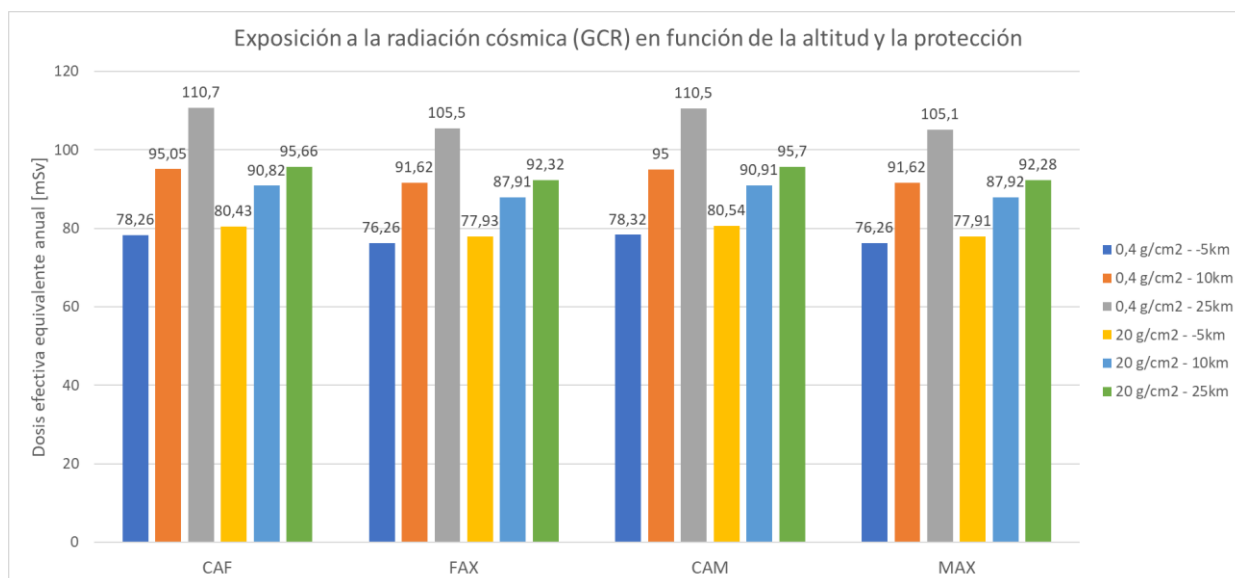


Fig 4.3.1. Dosis efectiva equivalente anual por exposición a la radiación cósmica en función de la altitud y protección

Los efectos en la salud de este tipo de radiación son más notables a largo plazo. El nivel máximo de exposición que calcula OLTARIS en estas simulaciones, dado para una

altitud de 25km y una protección de  $0,4 \text{ g/cm}^2$  en un modelo CAF, es decir, del género femenino, es de casi 111 mSv anuales. Si se compara este valor con el límite de dosis efectiva mínimo que establece la NASA en la Tabla 2.4.6, de 450 mSv anuales, se puede comprobar que con una estancia de un año en un entorno en el que solo existiese exposición a la radiación cósmica, no se superarían los límites que establece la NASA.

Por otro lado, si se comparan las dosis de los diferentes modelos, existe una tendencia que hace que la dosis calculada para los modelos CAF y CAM sea mayor aquella que resulta de hacer la simulación con los modelos MAX y FAX, con diferencias mínimas de unos 3 mSv/a manteniendo el resto de las condiciones de simulación iguales. Para un primer estudio a este nivel, en el que no son necesarios resultados con extremas precisiones, es indiferente el tipo de modelo a usar.

En cuanto a las diferencias de género, también se puede apreciar valores de exposición ligeramente superiores en los modelos femeninos (CAF y FAX) que en los masculinos (CAM y MAX).

A continuación, se representan las dosis equivalentes en los diferentes órganos necesarias para analizar el riesgo sobre la salud del ser humano, comparándolas con los límites que establece la NASA. Para ello, se analizará los niveles de exposición estimados mediante OLTARIS del cristalino, la piel, los órganos hematopoyéticos (BFO), el corazón y el sistema nervioso central (CNS).

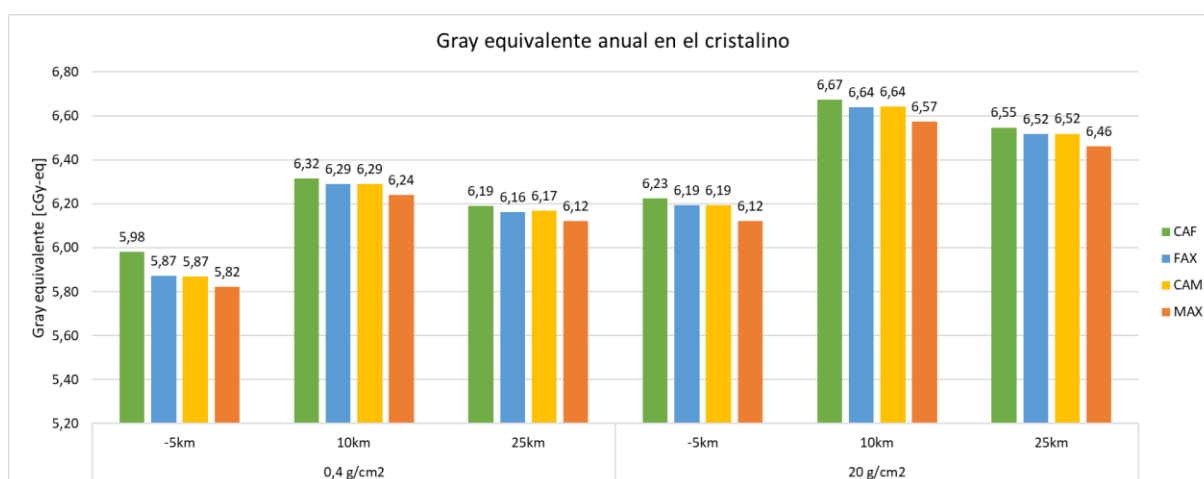


Fig 4.3.2. Dosis de exposición anual en el cristalino por exposición a la radiación cósmica

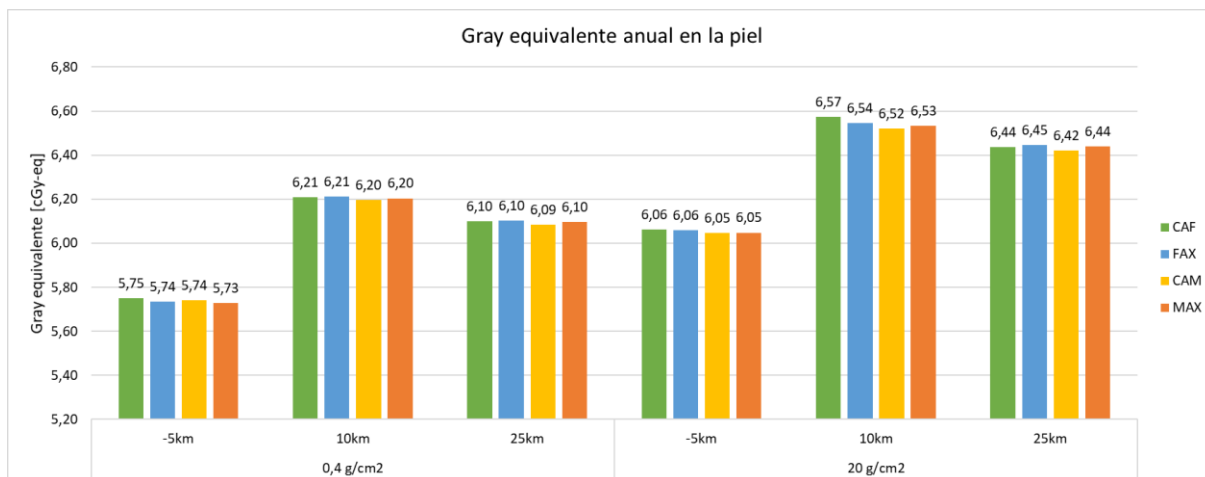


Fig 4.3.3. Dosis de exposición anual en la piel por exposición a la radiación cósmica

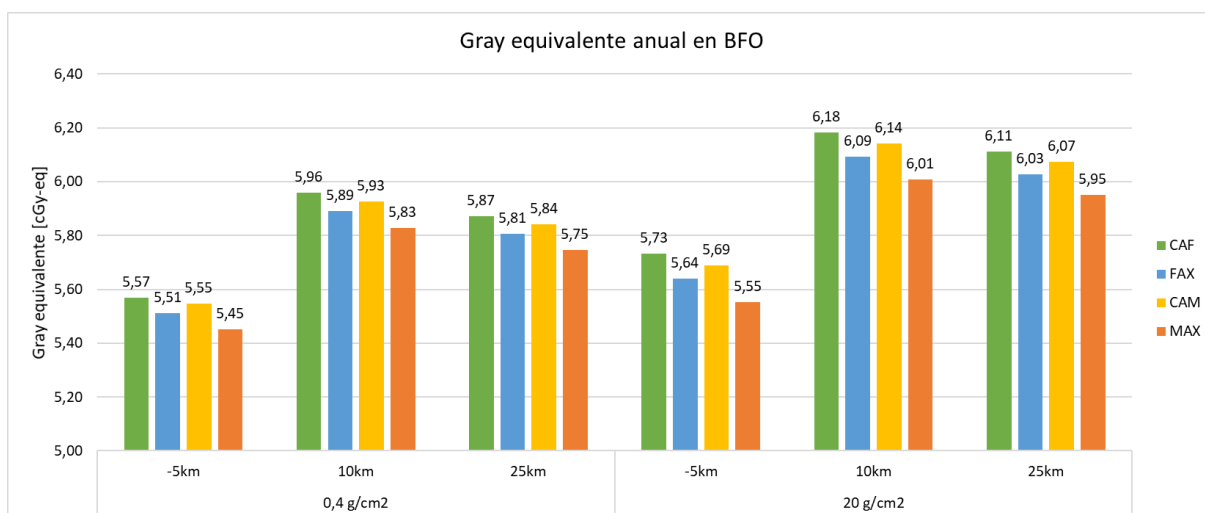


Fig 4.3.4. Dosis de exposición anual en BFO por exposición a la radiación cósmica

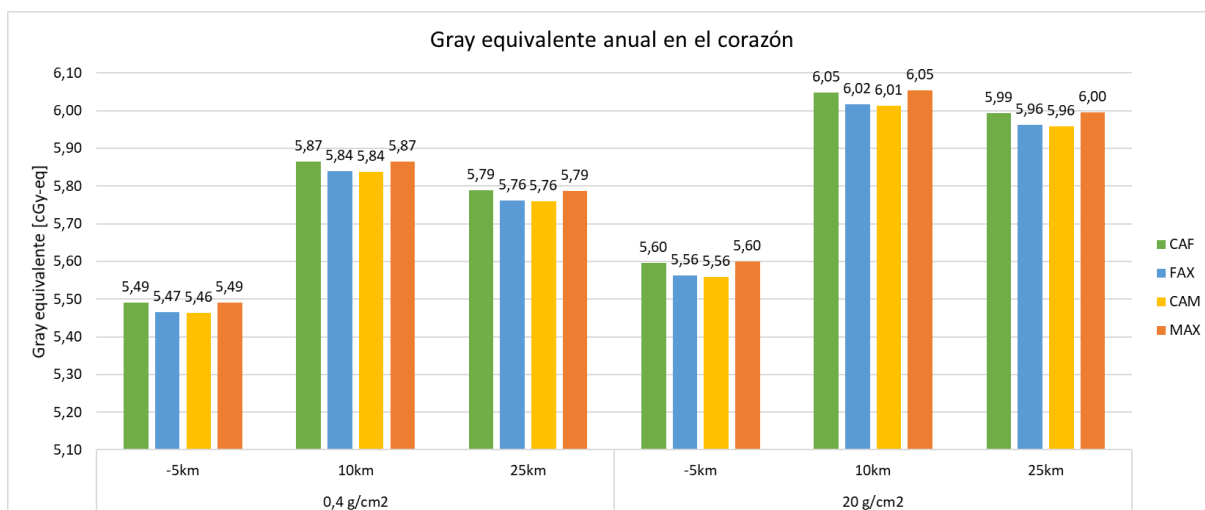


Fig 4.3.5. Dosis de exposición anual en el corazón por exposición a la radiación cósmica

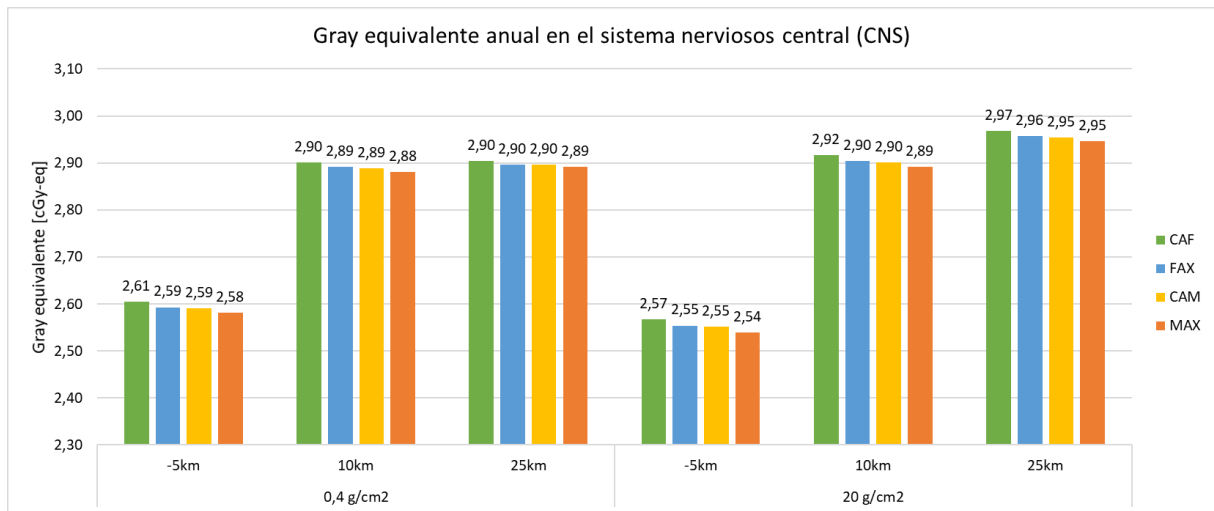


Fig 4.3.6. Dosis de exposición anual en el sistema nervioso central por exposición a la radiación cósmica

Comparando los niveles de exposición obtenidos en OLTARIS con los límites que establece la NASA para los principales órganos en la Tabla 2.4.8, se observa que ninguno de los escenarios simulados en OLTARIS para una exposición a la radiación cósmica supera los límites que establece la NASA para una misión de un año de duración. Sin embargo, si se tiene en cuenta que el objetivo es construir un asentamiento permanente en el planeta, durante el cual los astronautas estarían expuestos a la radiación durante largos periodos de tiempo, junto con el impacto de los eventos de partículas solares que se produjesen durante su estancia en Marte, los niveles de exposición serán mucho mayores. A continuación, se analiza el impacto que tienen los EPS en la exposición que recibe un astronauta en el planeta Rojo.

#### 4.4. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN POR EVENTOS DE PARTÍCULAS SOLARES EN MARTE

Tal y como se ha visto anteriormente, los eventos de partículas solares suponen una gran amenaza a corto plazo para la salud del ser humano en las misiones al espacio. Mediante las siguientes simulaciones se pretende establecer el nivel de riesgo de estos en función de distintos parámetros, así como hacer una estimación de la protección necesaria para no superar los límites de exposición que establece la NASA.

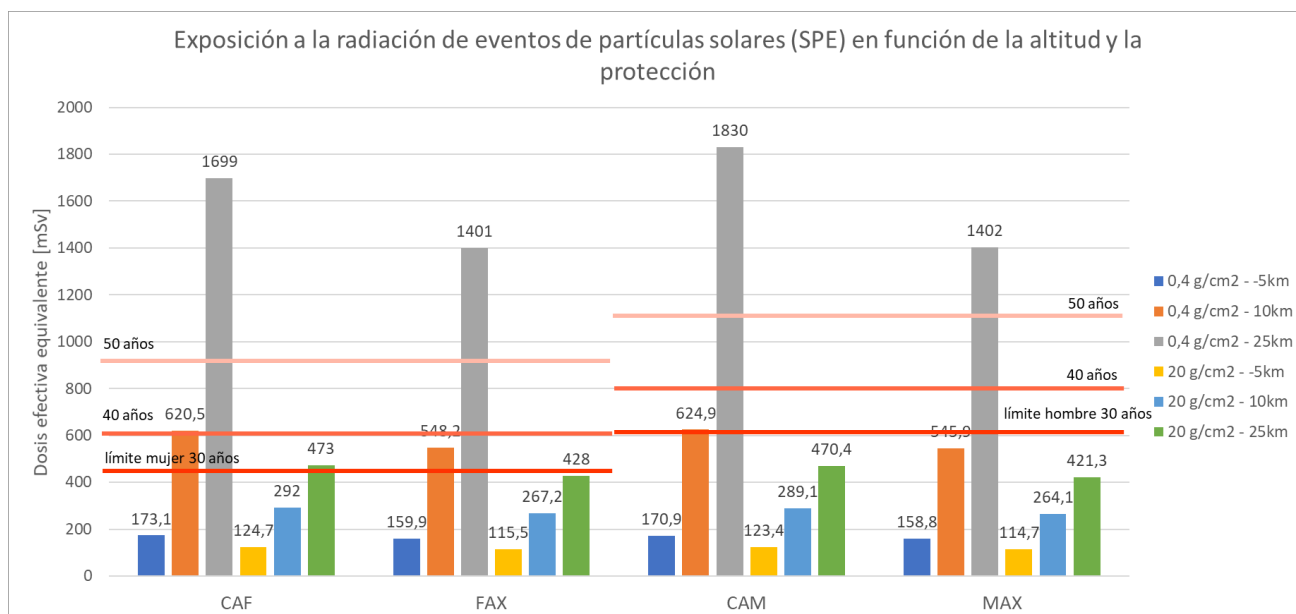


Fig 4.4.1. Dosis efectiva equivalente anual por exposición al evento de partículas solares Carrington 1859 en función de la altitud y protección

En la figura se pueden ver los diferentes valores estimados de exposición a la radiación del evento Carrington 1859 en los diferentes escenarios simulados, con los diferentes modelos que se han utilizado. A su vez, en líneas horizontales se representan los límites de exposición a la radiación que establece la NASA en la Tabla 2.4.6 en función de la edad y el género.

Como se puede observar, para una protección de aluminio de  $0,4\text{g/cm}^2$  en todos los escenarios cuya altitud superé los  $-5\text{km}$ , el ser humano estará expuesto a niveles mayores que los que permite la NASA, independientemente de la edad y el género.

Si el asentamiento se situase a  $25\text{km}$  sobre la superficie de Marte, la exposición a la que estaría expuesta una mujer menor de 30 años superaría los límites permitidos. En la siguiente tabla, se hace un resumen de los límites de edad y género que tendría cada escenario simulado.

	0,4 g/cm <sup>2</sup>			20 g/cm <sup>2</sup>		
Módelo	-5km	10km	25km	-5km	10km	25km
CAF	Todos	+40	Ninguna	Todos	Todos	+30
FAX	Todos	+35	Ninguna	Todos	Todos	Todos
CAM	Todos	+30	Ninguno	Todos	Todos	Todos
MAX	Todos	Todos	+50	Todos	Todos	Todos

Tabla. 4.4.1. Escenarios que no superan los límites de exposición a la radiación establecidos por la NASA en función de edad y género.

En las siguientes figuras se representan las dosis equivalentes de los órganos más importantes para estimar el riesgo para la salud por exposición a la radiación en el caso de eventos de partículas solares.

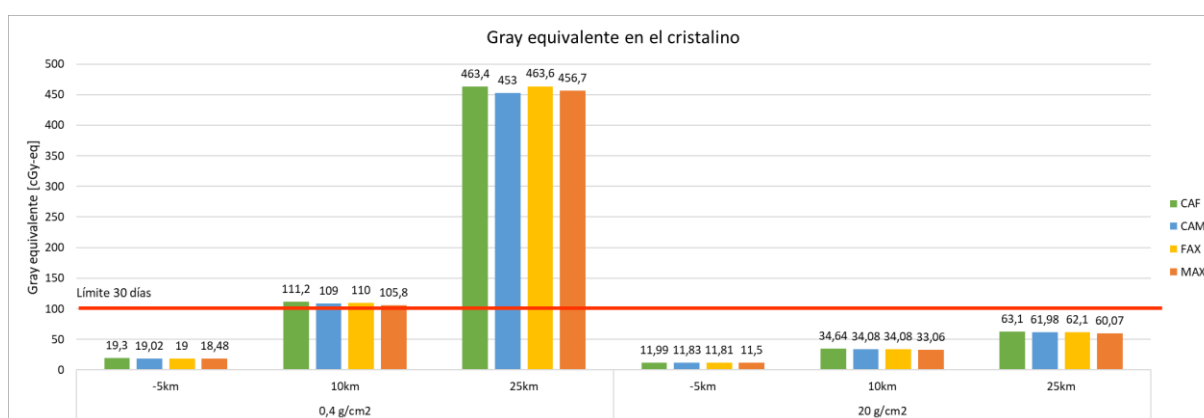


Fig 4.4.2. Dosis de exposición anual en el cristalino por exposición a evento de partículas solares

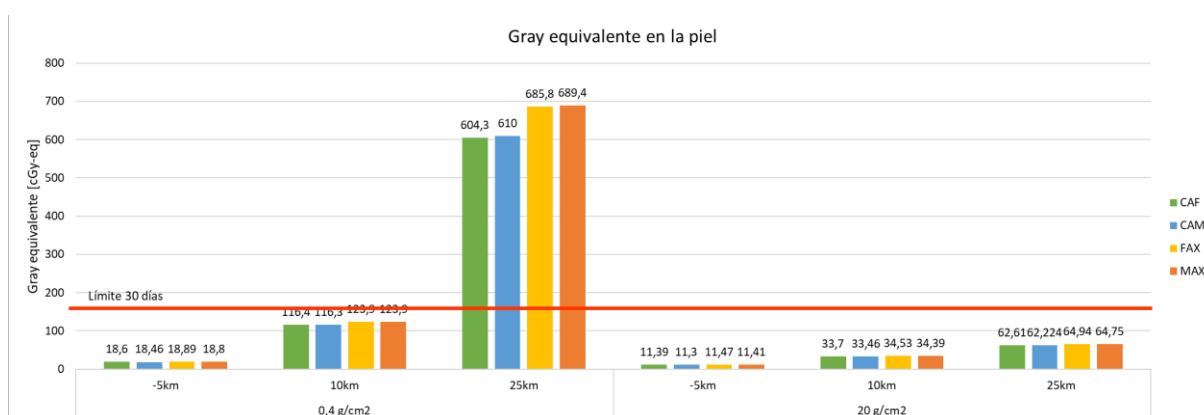


Fig 4.4.3. Dosis de exposición anual en la piel por exposición a evento de partículas solares

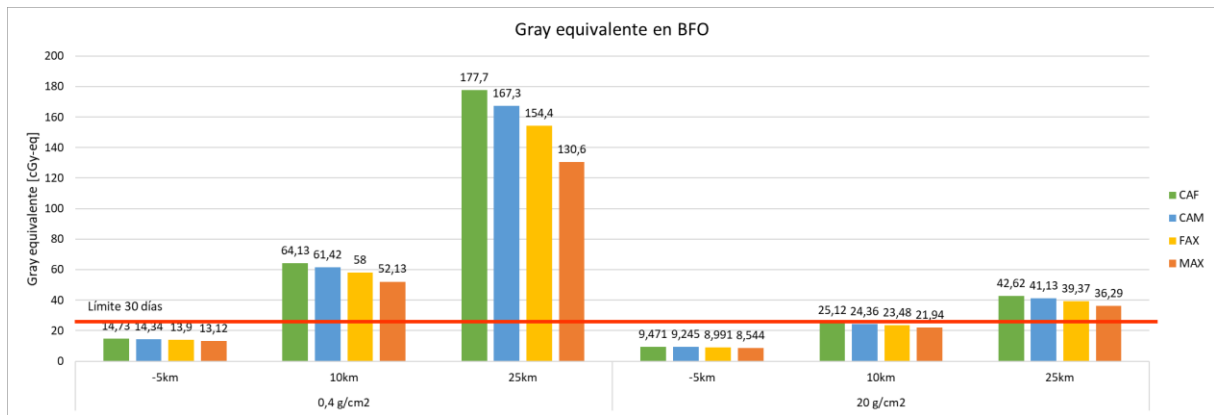


Fig 4.4.4. Dosis de exposición anual en BFO por exposición a evento de partículas solares

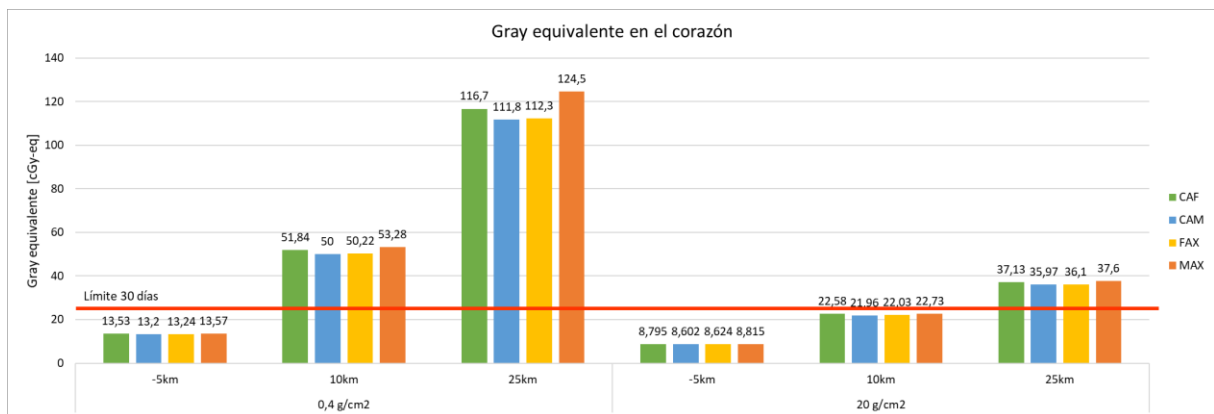


Fig 4.4.5. Dosis de exposición anual en el corazón por exposición a evento de partículas solares

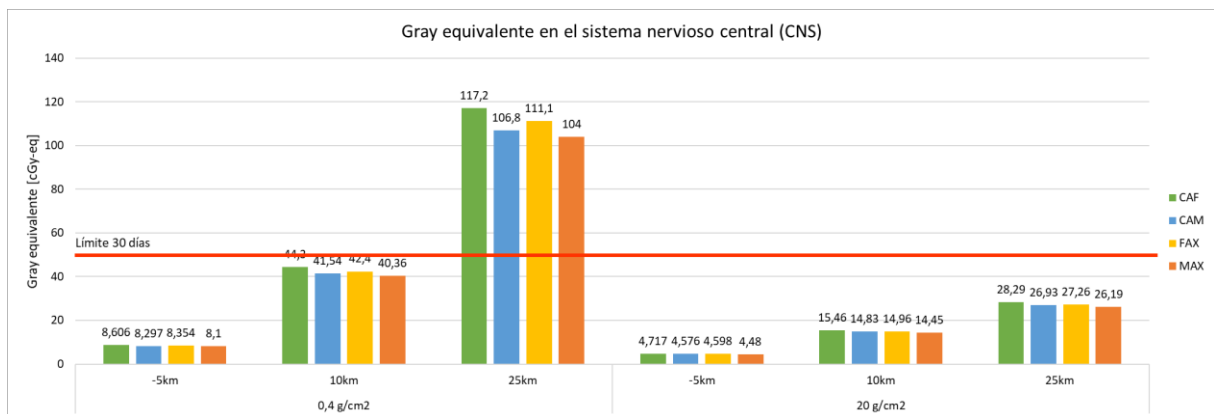


Fig 4.4.6. Dosis de exposición anual en el sistema nervioso central por exposición a evento de partículas solares

Como en el caso de la radiación cósmica, se compara los valores estimados por OLTARIS para los diferentes órganos en los distintos escenarios, con los límites que establece la NASA en la Tabla 4.2.8

El órgano en contacto con el entorno y más expuesto a la radiación, la piel, es el que alcanza valores de exposición más altos, alcanzando los 600 cGy-eq a 25km sobre la

superficie con una protección de  $0,4 \text{ g/cm}^2$ . Otro de los órganos más expuestos, es el cristalino, alcanzando los  $450 \text{ cGy-eq}$  en las mismas condiciones.

Si se comparan estos niveles de exposición y el del resto de órganos con los límites que establece la NASA se puede observar como el corazón y los órganos hematopoyéticos son aquellos más críticos ya que superan los límites permisibles establecidos en todos los escenarios a 10 y 25 km sobre la superficie.

En comparación con los niveles de exposición frente a la radiación cósmica, se observa como el espectro de EPS es más sensible a cambios en el blindaje, variando en mayor medida según se aumenta la protección frente a la radiación. También existe una variación mayor en las dosis de los diferentes órganos, de unos  $680 \text{ cGy-eq}$  en la piel hasta unos  $100 \text{ cGy-eq}$  en el sistema nervioso central, así como una gran variación en función de la altura sobre la superficie de Marte, oscilando para un mismo órgano como la piel de  $20 \text{ cGy-eq}$  a  $680 \text{ cGy-eq}$ .

#### 4.5. ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN SEGÚN LA PROTECCIÓN

Multitud de materiales pueden actuar como blindaje contra la radiación dependiendo de la cantidad de material que se utilice. La protección reduce la intensidad de la radiación en función del grosor y el tipo de material, aumentando cuanto mayor sea el número atómico del elemento. En la siguiente figura se puede apreciar cómo influye la densidad del material de blindaje a las dosis de exposición a la radiación, en este caso frente al evento de partículas solares de 1859, Carrington.

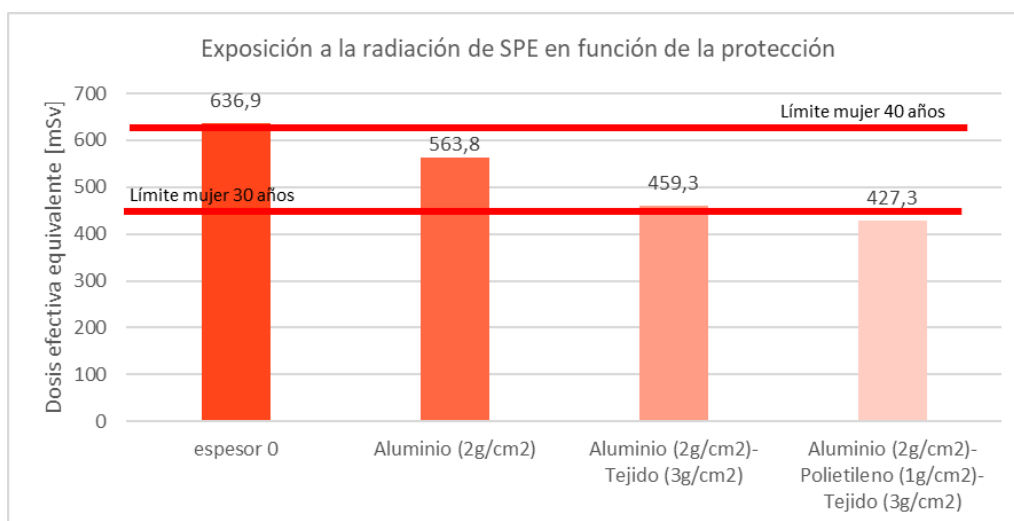


Fig 4.5.1. Exposición a la radiación de EPS en función de la protección a 10km sobre la superficie de Marte



El material analizado ha sido el principal material que ofrece OLTARIS y que se utiliza en la fabricación de equipamiento espacial, junto a otra gran variedad de materiales. En la figura se puede observar como a medida que se aumenta la densidad del material y se combina con otros materiales, las dosis a las que está expuesto el astronauta; en este caso una mujer; son menores. Los valores resultantes de la simulación muestran que este tipo de protección no sería suficiente ya que la persona superaría los niveles máximos permitidos en la carrera de una astronauta únicamente estando expuesta a un evento del nivel del evento Carrington de 1859. Considerando que se pretendiese establecer un asentamiento permanente en Marte, sería necesario reforzar el blindaje mediante el uso de materiales compuestos que ofreciesen mayor protección y permitiesen al astronauta permanecer fuera del módulo sin exponerse al riesgo de sufrir ninguna enfermedad de carácter cancerígeno.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSIONES

El software OLTARIS hace posible la realización de simulaciones en numerosos escenarios de manera rápida y lo suficientemente precisa como para analizar la influencia de determinados parámetros en los efectos de la radiación sobre el ser humano. Esta herramienta es perfecta a la hora de analizar el blindaje necesario para construir un traje espacial, una nave o bien un asentamiento permanente en el planeta. De esta forma, se pueden realizar numerosos ensayos modificando las geometrías y condiciones de una manera rápida y económica, sin tener que construir y realizar prototipos para todas las iteraciones que se quieran realizar.

Una vez realizada la simulación en los 48 escenarios descritos en la Tabla 3.3.1 se puede determinar a grandes rasgos que, al tratarse de una misión que tiene como objetivo crear un asentamiento permanente en Marte, es decir, superará duración de 1 año, habrá que tener en cuenta tanto la protección frente a la radiación cósmica a la que está expuesto continuamente el ser humano, y aquella que esté producida por los eventos de partículas solares. Como se ha podido comprobar, el primer tipo de radiación será perjudicial a largo plazo, mientras que las altas energías que se alcanzan en los eventos de partículas solares afectan gravemente al ser humano a corto plazo, suponiendo un grave riesgo para la salud.

- En este tipo de simulaciones, en el que la precisión de los resultados buscada no es crítica, es independiente el uso de cualquiera de los dos tipos de modelos humanos (CAF/CAM vs FAX/MAX), ya que la diferencia entre los niveles de exposición estimados en uno y otro es mínima.
- La atmósfera de Marte ejerce como protección frente a la radiación, por lo que los niveles de exposición que se alcanzan son más elevados cuanto mayor sea la altitud a la que se encuentre el asentamiento sobre el planeta. De esta forma sería ideal localizar el asentamiento en puntos bajos del planeta y que además cuenten con protección adicional como cráteres de volcanes o cañones.
- La relación entre la exposición a la radiación espacial y la carcinogénesis es específica de la edad y el sexo. Como se observa en la Tabla 2.4.6 los límites permisibles de la dosis eficaz aumentan con la edad debido a los efectos de latencia del tumor sólido formación.

- En general, las dosis equivalentes de los principales órganos superan los límites permisibles por la NASA, siendo los órganos más sensibles el corazón y los órganos hematopoyéticos.
- Teniendo en cuenta que el software no te permite analizar ambas fuentes de radiación en conjunto y que únicamente se ha analizado un caso de evento de partículas solares, los niveles de exposición a los que estaría expuesto un astronauta en una misión permanente en el planeta serían mucho más elevados, ya que estaría expuesto de continuo a la radiación cósmica existente y los eventos solares que se produjesen en determinados periodos de tiempo. Es por ello por lo que los blindajes tradicionales que se utilizan en las misiones al espacio, tanto en trajes espaciales como en naves, no ofrecen la suficiente protección para proteger al ser humano en todas las condiciones a las que estaría expuesto en el planeta, conllevando un riesgo muy alto de desarrollar enfermedades cancerígenas o cardiovasculares, entre otras, pudiendo ocasionar la muerte. Especialmente en el caso de producirse eventos de partículas solares como el Carrington, producido en 1859.

Las primeras simulaciones muestran que la localización ideal para construir un asentamiento o modulo habitable en Marte sería en una zona lo más profunda posible, protegida en mayor medida por la fina atmósfera del planeta y en la que el ser humano estaría expuesto a niveles más seguros de radiación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en zonas tan profundas del planeta, las temperaturas pueden alcanzar los  $-100^{\circ}\text{C}$  en invierno, es decir, temperaturas críticas para el ser humano.

Por lo tanto, lo ideal sería localizar el asentamiento en una localización más elevada, donde las temperaturas se acercasen a las presentes en el planeta Tierra y no fuesen tan extremas; unido a la construcción de un módulo que presente la suficiente protección contra la radiación para hacer posible que el ser humano permanezca durante largas estancias en el planeta sin sufrir ningún daño ni desarrollar enfermedades.

En resumen, si se considera construir un asentamiento permanente en el planeta

## 5.2. TRABAJOS FUTUROS

A la hora de llevar a cabo una misión con objetivo de construir un asentamiento en Marte, este proyecto es una parte que representa un porcentaje mínimo en el total de las partes que lo compongan.

En términos de estudiar la radiación, habría que realizar un análisis previo, similar al llevado a cabo en este proyecto, en el que se estimase la exposición a la radiación en el viaje hacia Marte para optimizar la protección contra la radiación en el global de la misión.

Posteriormente a estas primeras estimaciones, que representan a grandes rasgos los efectos de la radiación en Marte sobre el ser humano, sería necesario hacer un estudio sobre nuevos materiales y formas de blindar frente a la radiación. El software OLTARIS ofrece la posibilidad de añadir materiales propios definidos por el usuario, que permitirían analizar el efecto que tendrían sobre las dosis de exposición a las que se expondrían los astronautas. También sería conveniente realizar próximas simulaciones más concretas con otros softwares más precisos y compararlas con las realizadas en OLTARIS. Resumiendo, se finalizaría con las posteriores fases, siguiendo con la fase de diseño de detalle, el desarrollo y testeo de prototipos, para finalizar con la fabricación definitiva del módulo.

## REFERENCIAS

- NASA's Mars Exploration Program. (2014, June 03). Retrieved from <https://mars.nasa.gov/#>
- W Finger, B., A Lantz, G., W Theno, T., & Anderson, G. (2015). Mars One Habitat ECLSS (ECLSS) Conceptual Design Assessment [Ebook]. Retrieved from [http://www.mars-one.com/images/uploads/Mars\\_One\\_Habitat\\_ECLSS\\_Conceptual\\_Design\\_Assessment.pdf](http://www.mars-one.com/images/uploads/Mars_One_Habitat_ECLSS_Conceptual_Design_Assessment.pdf)
- Francis A. Cucinotta, Myung-Hee Y. Kim & Lori J. Chappell. Space Radiation Cancer Risk Projections and Uncertainties. (2013). [Ebook]. NASA Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas. Retrieved from <https://spaceradiation.jsc.nasa.gov/irModels/TP-2013-217375.pdf>
- 1.4 Requirements for Human Life – Anatomy and Physiology. (2018). Retrieved from <https://opentextbc.ca/anatomyandphysiology/chapter/1-4-requirements-for-human-life/>
- NASA. "Life on Earth . . . and elsewhere?" NASA. 2006. (June 23, 2014) NASA Ames Research Center, Moffett Field, California. Retrieved from <https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2013/10/Astrobiology-Educator-Guide-2007.pdf#page=23>
- Lunar and Planetary Institute. "What Makes a World Habitable?" Universities Space Research Association. 2014. (June 23, 2014). Retrieved from [https://www.lpi.usra.edu/education/explore/our\\_place/hab\\_ref\\_table.pdf](https://www.lpi.usra.edu/education/explore/our_place/hab_ref_table.pdf)
- Science, L. (2018). What Are the Limits of Human Survival? Retrieved from <https://www.livescience.com/34128-limits-human-survival.html>
- A Brief History of Mars Missions. (2018). Retrieved from <https://www.space.com/13558-historic-mars-missions.html>
- Hu, S. (2017). Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space [Ebook]. Houston, TX: KBRwyle. Retrieved from <https://three.jsc.nasa.gov/articles/hu-spes.pdf>
- R.C. Singletary, S.R. Blattner, M.S. Cloudsley, G.D. Qualls, C.A. Sandridge, L.C. Simonsen, J.W. Norbury, T.C. Slaba, S.A. Walker, F.F. Badavi, J.L. Spangler, A.R.

Aumann, E.N. Zapp, R.D. Rutledge, K.T. Lee, R.B. Norman, "OLTARIS: On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space". <https://oltaris.nasa.gov/links>

- Senda Editorial S.A. (2018). 103 ICRP. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica [Ebook]. Capitán Haya, 60 - 28020 Madrid.
- Francis A. Cucinotta, Ph.D. (2010) Radiation Risk Acceptability and Limitations. <https://three.jsc.nasa.gov/articles/astronautradlimitsfc.pdf>